

MODELO HIDRODINÁMICO Y DE OLEAJE DEL MAR CARIBE

DELFT CARIBE

FEDERICO POSADA JARAMILLO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
TIERRA

Asesor:

Iván Darío Correa Arango

Doctor en Geología Marina

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MEDELLÍN

2019

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín día mes 2019

AGRADECIMIENTOS

Cuando decidí consignar mis agradecimientos por la colaboración y el apoyo para la realización de esta tesis, encontré que muchas personas y entidades contribuyeron en el proceso. Y que había creado grandes lazos de amistad con muchas de ellas, que espero perduren en el tiempo.

Muy especialmente quiero agradecer:

A mis padres, quienes durante toda mi vida han apoyado mis proyectos, y este no fue la excepción.

Al profesor Iván Correa, por asesorarme en la revisión final de este trabajo y por dar esa voz de aliento en los momentos más difíciles.

Al profesor Carlos Alejandro Escobar, por su acompañamiento durante parte del tiempo, por todo lo que me enseñó y por darme la oportunidad de participar en estas investigaciones. Igualmente, a todo el grupo de profesores del Área de Ciencias del Mar de la Universidad EAFIT, especialmente a Juan Darío Restrepo y a Jesús Alberto Pérez.

A mi compañero de investigación y gran amigo, el ingeniero Heber Alejandro Escobar, por sus aportes para la construcción del modelo del mar Caribe; también a Liliana Velásquez por su apoyo en la logística del proyecto de Urabá y por siempre darme ánimos.

A Colciencias, por el patrocinio de las investigaciones Erosión costera en Antioquia: Dinámica sedimentaria del golfo de Urabá, (erosión-depositación) durante los últimos 10 000 años, fases I y II.

A la Escuela de Ingeniería de la Universidad EAFIT, por el apoyo financiero.

A Integral S.A., especialmente a los ingenieros Gabriel Jaime Cano y Gabriel Jaime Lacouture, pues sin su apoyo tanto en tiempo como financiero no hubiera podido realizar este trabajo.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
1.1	OBJETIVOS GENERALES	¡Error! Marcador no definido.
1.2	ÁREA DE ESTUDIO	¡Error! Marcador no definido.
2.	ESTADO DEL ARTE	¡Error! Marcador no definido.
2.1	MODELOS CONTINENTALES EXISTENTES	¡Error! Marcador no definido.
2.2	METODOLOGÍAS EXISTENTES DEL CÁLCULO DEL OLEAJE, LAS MAREAS Y LAS CORRIENTES EN EL MAR CARIBE	¡Error! Marcador no definido.
3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL CARIBE	¡Error! Marcador no definido.
3.1	ASPECTOS FÍSICOS Y NUMÉRICOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS MAREAS, LAS CORRIENTES Y EL OLEAJE	¡Error! Marcador no definido.
3.2	LA MALLA DEL MODELO Y PARÁMETROS DE ENTRADA	¡Error! Marcador no definido.
4.	FUENTES DE INFORMACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.1	TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	¡Error! Marcador no definido.
4.2	AFLUENTES	¡Error! Marcador no definido.
4.3	MAREAS ASTRONÓMICAS	¡Error! Marcador no definido.
4.4	OLEAJE ENTRANTE (SWELL)	¡Error! Marcador no definido.
4.5	VIENTOS Y PRESIONES ATMOSFÉRICAS	¡Error! Marcador no definido.
4.6	BOYAS Y MAREÓGRAFOS DENTRO DEL MODELO	¡Error! Marcador no definido.

- 5. METODOLOGÍA GENERAL **¡Error! Marcador no definido.**
- 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1 EL COSTO COMPUTACIONAL DEBIDO A LA VARIACIÓN DEL INTERVALO DE CÁLCULO DEL OLEAJE (Δt_{oleaje}) **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.2 EL COSTO COMPUTACIONAL DEBIDO A LA VARIACIÓN DEL INTERVALO DE CÁLCULO HIDRODINÁMICO (Δt_{hidrod}) **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.3 EL COEFICIENTE DE DRAGADO Y SU INFLUENCIA EN EL OLEAJE **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.4 LA RUGOSIDAD DEL FONDO Y SU INFLUENCIA EN LOS NIVELES DE MAREA **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.5 EFECTOS DE LA VISCOSIDAD DE REMOLINO EN LOS NIVELES DEL MAR Y LOS PATRONES DE CIRCULACIÓN **¡Error! Marcador no definido.**
- 7. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO **¡Error! Marcador no definido.**
- 7.1 CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE DRAGADO **¡Error! Marcador no definido.**
- 7.2 CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE LA RUGOSIDAD DEL FONDO **¡Error! Marcador no definido.**
- 7.3 CALIBRACIÓN DEL VALOR DE LA VISCOSIDAD DE REMOLINO **¡Error! Marcador no definido.**
- 7.4 CALIBRACIÓN Y ELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS DEL VIENTO Y LAS PRESIONES ATMOSFÉRICAS **¡Error! Marcador no definido.**
- 7.5 PARÁMETROS CALIBRADOS DEL MODELO DEL MAR CARIBE **¡Error! Marcador no definido.**

7.6	VALIDACIÓN DEL OLEAJE	¡Error! Marcador no definido.
7.7	VALIDACIÓN DE LAS MAREAS	¡Error! Marcador no definido.
7.8	VALIDACIÓN DE LAS CORRIENTES	¡Error! Marcador no definido.
7.9	VALIDACIÓN DEL MODELO CON CAMBIOS EN EL SWELL	¡Error! Marcador no definido.
8.	APLICACIONES	¡Error! Marcador no definido.
8.1	EFFECTOS DEL SWELL EN EL OLEAJE LOCAL.	¡Error! Marcador no definido.
8.2	INTERACCIÓN DEL OLEAJE Y LAS CORRIENTES EN EL CARIBE	¡Error! Marcador no definido.
8.3	AUMENTOS EN LAS ALTURAS DE LAS MAREAS Y EL OLEAJE POR EL PASO DEL HURACÁN JOAN, SIMULADOS CON LAS VELOCIDADES Y PRESIONES ATMOSFÉRICAS EN EL OJO DEL HURACÁN OBTENIDAS DEL nhc	¡Error! Marcador no definido.
8.4	EL OLEJAE GENERADO POR EL PASO DE LOS FRENTE FRÍOS EN EL 2009.	¡Error! Marcador no definido.
9.	CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
10.	BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.

FIGURAS

Figura 1.1 La batimetría, los mareógrafos y las boyas direccionales en el área de estudio.	21
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de modelación acoplado entre los módulos Flow y Wave del Delft 3D.	36
Figura 3.2 Malla curvilínea del modelo.	37
Figura 4.1 Condiciones de frontera, mareógrafos y boyas de oleaje.	39
Figura 4.2 Constituyentes de marea en las fronteras del modelo.	42
Figura 4.3 Rosas de alturas significativas entre 2007 y 2009 al norte del modelo.	43
Figura 4.4 Rosas de los periodos al pico entre 2007 y 2009 al norte del modelo.	43
Figura 4.5 Malla atmosférica sobre el área de estudio.	45
Figura 6.1 Costo computacional Vs. Intervalo de cálculo del oleaje (Δt_{oleaje} .)	52
Figura 6.2 Costo computacional Vs. El intervalo de cálculo hidrodinámico ($\Delta t_{hidrod.}$)	53
Figura 6.3 Puntos de monitoreo del modelo en el litoral Caribe colombiano.	55
Figura 6.4 Puntos de monitoreo de las mareas para el análisis de sensibilidad.	57
Figura 7.1 DPT de las velocidades del viento en el sentido occidente a oriente.	71
Figura 7.2 DPT de las velocidades del viento en el sentido sur a norte.	72
Figura 7.3 El Oleaje medido y el simulado por el Modelo del Caribe y por el WWIII en Puerto Bolívar.	79
Figura 7.4 El Oleaje medido y el simulado por el Modelo del Caribe y por el WWIII en Barranquilla.	80
Figura 7.5 Niveles de marea para los periodos de calibración y validación del modelo en Cartagena, La Guaira y San Cristóbal	82

Figura 7.6 Niveles del mar simulados Vs. los Niveles medidos	83
Figura 7.7 Variación de las mareas en el Caribe Colombiano durante 2009 (POSADA JARAMILLO, FEDERICO y ESCOBAR SIERRA, CARLOS A., 2012).	84
Figura 7.8 Mediciones de la corriente del Caribe (RICHARDSON, P.L., 2005).	86
Figura 7.9 Mediciones del giro Panamá - Colombia Caribe (RICHARDSON, P.L., 2005).	86
Figura 7.10 Velocidades y direcciones medias de las corrientes superficiales durante la época seca del 2009.	87
Figura 7.11 Velocidades y direcciones medias de las corrientes superficiales durante la época húmeda del 2010.	88
Figura 7.12 Hs. y direcciones del oleaje medias en el Caribe en a) la época seca de 2009 y b) la época húmeda de 2010.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8.1 Puntos donde se analizó el swell en el litoral Caribe colombiano.	91
Figura 8.2 Recorrido del Huracán Dean (18 al 28 de agosto, 2007)	98
Figura 8.3 Recorrido del Huracán Félix (1 al 9 de septiembre, 2007).	98
Figura 8.4 Comparación de las Hs. para los 13 puntos de monitoreo en todas las épocas.	102
Figura 8.5 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell en la época seca.	105
Figura 8.6 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell en la época húmeda.	106
Figura 8.7 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell durante los huracanes Dean y Felix.	107
Figura 8.8 El oleaje medido y el simulado para la época seca con y sin el swell.	108

Figura 8.9 El oleaje medido y el simulado para la época de lluvias con y sin el swell.	109
Figura 8.10 La interacción ola – corrientes y sus efectos en el oleaje, las mareas y las corrientes superficiales.	113
Figura 8.11 Interacción de las alturas significativas, las velocidades superficiales, y las profundidades en las épocas secas y húmedas.	114
Figura 8.12 Trayectoria del Huracán Joan (10 al 23 de octubre), modificada del Centro Nacional de Huracanes de la NOAA.	116
Figura 8.13 Presiones atmosféricas y velocidades en el ojo del huracán Joan (NHC).	118
Figura 8.14 Hs. calculadas solo con el NARR durante el huracán Joan el 20 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator)	119
Figura 8.15 Hs. calculadas con el NARR y con el viento del ojo, durante el huracán Joan el 20 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).	119
Figura 8.16 Hs. calculadas solo con el NARR, durante el huracán Joan el 21 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).	119
Figura 8.17 Hs. calculadas con el NARR y con el viento del ojo, durante el huracán Joan el 21 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).	120
Figura 8.18 Diferencias entre las Hs de las dos simulaciones del huracán Joan el 22 de octubre 3:00 am.	121
Figura 8.19 Alturas de oleaje máximas durante el paso de los frentes fríos del 2009.	124

TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros físicos y numéricos para las primeras simulaciones.	37
Tabla 4.1 Caudales de los principales afluentes.	40
Tabla 4.2 Constituyentes de marea y sus periodos (T).	41
Tabla 5.1 Estándares para la calificación del modelo utilizando el RMAE y REV.	49
Tabla 6.1 Coeficientes de dragado del modelo patrón.	54
Tabla 6.2 Alternativas evaluadas de los coeficientes de dragado.	55
Tabla 6.3 Valores del n de Manning evaluados en el análisis de sensibilidad.	58
Tabla 6.4 Diferencias máximas en las mareas debidas a los cambios en el n de Manning.	59
Tabla 6.5 Alternativas de la Viscosidad de Remolino evaluadas en el análisis de sensibilidad.	60
Tabla 6.6 DAPTR Máximos debidos a los cambios en la Viscosidad de Remolino.	61
Tabla 7.2 Comparaciones entre las Hs simuladas con respecto a las mediciones de la boya de Puerto Bolívar debidas a los cambios en los Cd.	64
Tabla 7.3 Comparaciones entre los Tp simulados con respecto a las mediciones de la boya de Barranquilla debidas a los cambios en los Cd.	65
Tabla 7.4 Comparaciones entre los Tp simulados con respecto a las mediciones de la boya de Puerto Bolívar debidas a los cambios en los Cd.	65
Tabla 7.5 Error Vectorial Relativo (REV) en las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar debidos a los cambios en los coeficientes de dragado del viento.	66
Tabla 7.6 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en Cartagena debidos a los cambios en los coeficientes de rugosidad del fondo.	67

Tabla 7.7 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en La Guaira debidos a los cambios en los coeficientes de rugosidad del fondo.	67
Tabla 7.8 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en San Cristóbal debidos a los cambios de rugosidad del fondo.	68
Tabla 7.9 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en Cartagena por los cambios en la viscosidad de remolino.	69
Tabla 7.10 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en La Guaira debidos a los cambios en la viscosidad de remolino.	69
Tabla 7.11 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en San Cristóbal debidos a los cambios en la viscosidad de remolino.	69
Tabla 7.12 Errores de las Hs con respecto a los datos de la boya en Barranquilla debidas a la utilización del NARR y el NCAR.	73
Tabla 7.13 Errores de las Hs con respecto a los datos de la boya en Puerto Bolívar por la utilización del NARR y el NCAR.	73
Tabla 7.14 Errores de los Tp con respecto a los datos de la boya en Barranquilla por la utilización del NARR o el NCAR.	73
Tabla 7.15 Errores de los Tp con respecto a los datos de la boya en Puerto Bolívar por la utilización del NARR y el NCAR.	73
Tabla 7.16 Diferencias direccionales de las simulaciones debidas a la utilización del NARR y el NCAR con respecto a las boyas direccionales de oleaje.	74
Tabla 7.17 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de Cartagena debidas a la utilización del NARR y el NCAR.	74
Tabla 7.18 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de La Guaira debidas a la utilización del NARR y el NCAR.	74
Tabla 7.19 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de La Guaira debidas a la utilización del NARR y el NCAR.	75

Tabla 7.20 Parámetros de entrada del modelo calibrado.	76
Tabla 7.21 RMAE y REV encontrados con el modelo calibrado durante el 2009.	77
Tabla 7.22 Errores de las mareas simuladas con el modelo en 2D con respecto a las mediciones de mareas.	81
Tabla 7.24 RMAE del oleaje del 2009 con swell del WWIII. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 8.1 Periodos simulados para evaluar la influencia del swell en el Caribe.	90
Tabla 8.3 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp de la Época seca	94
Tabla 8.4 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones de la época seca.	95
Tabla 8.5 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las Hs de la época de lluvias.	96
Tabla 8.6 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp de la época de lluvias.	97
Tabla 8.7 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones de la época de lluvias.	97
Tabla 8.8 Escala Saffir Simpson de huracanes y clasificación de las tormentas, modificado del Centro Nacional de Huracanes de la NOAA. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 8.9 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las Hs del periodo de huracanes.	100
Tabla 8.10 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp del Periodo de huracanes.	100
Tabla 8.11 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones durante los huracanes Felix y Dean.	101

Tabla 8.12 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para la época seca.	103
Tabla 8.13 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para la época de lluvias.	103
Tabla 8.14 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para el periodo de huracanes.	104
Tabla 8.15 Errores de las simulaciones incluyendo el swell y sin este.	110
Tabla 8.16 Frentes fríos del año 2009	123

ANEXOS

- ANEXO A CONSTITUYENTES DE LAS MAREAS EN LAS FRONTERAS DEL MODELO
- ANEXO B MANUAL PARA CREACIÓN DE LAS MALLAS DE VIENTOS PARA EL DELFT
 3D
- Anexo C CONDICIONES DE FRONTERA PARA UN MODELO ANIDADO DEL GOLFO
 DE URABÁ

RESUMEN

Se presenta un modelo matemático de gran escala en dos dimensiones, que luego fue migrado a tres dimensiones, que acopla la hidrodinámica y el oleaje al sur del mar Caribe, llamado Delft Caribe.

La baja cobertura espacial y temporal de las mediciones oceanográficas en el área de estudio y la necesidad de conocer el oleaje, las corrientes, las mareas y las interacciones entre estas en diferentes puntos de interés motivó la construcción de este modelo.

Se utiliza la plataforma de modelación Delft 3D, ampliamente validada para la simulación multidimensional de flujos y fenómenos de transporte. El modelo considera en sus fronteras el forzamiento propio de la marea; los factores atmosféricos, la descarga de tributarios y el oleaje proveniente del océano Atlántico.

Los resultados se validaron, cualitativamente y estadísticamente, para las épocas secas y húmedas. Los buenos resultados del modelo permiten realizar diferentes experimentos enfocados a conocer el desempeño de la herramienta para calcular lo siguiente:

- Las velocidades de las corrientes superficiales.
- Los cambios en las direcciones y las alturas del oleaje.
- Los niveles de las mareas.
- Los cambios en las variables anteriores debidos al paso de frentes fríos y huracanes.

Se observó que el oleaje en el sur del Caribe se propaga paralelo a los vientos Alisios (Nororiente a Suroccidente) desde las Antillas menores hasta la península de la Guajira, sitio desde el cual se propaga hacia las costas centroamericanas de Honduras y Nicaragua, y al mismo tiempo hacia el sur hasta llegar al golfo de Urabá y las costas de Costa Rica y Panamá.

Las alturas significativas en el área del modelo aumentan en la época seca y con el paso de las tormentas, con alturas de olas hasta de:

- 6 m en la zona cerca a la Guajira.
- 3 m en el golfo de Urabá.
- 3 m en la zona del Archipiélago de San Andrés.

El modelo simula coherentemente la corriente del Caribe y el giro Panamá - Colombia. La corriente del Caribe entra procedente del Atlántico por la frontera oriental del modelo y viaja hasta la península de la Guajira, donde gira hacia el golfo de México. El giro Panamá-Colombia viaja desde Panamá hacia Colombia, con velocidades mayores durante la época húmeda cuando la corriente del Caribe es menos fuerte.

Palabras Claves: Modelo matemático de gran escala, Delft 3D, Oleajes, Mareas, Mar Caribe, Corrientes, Frentes Fríos, Huracanes.

ABSTRACT

A two-dimensional large scale mathematical model is presented, which was later migrated to three dimensions, coupling hydrodynamics and waves in the southern Caribbean Sea, named Delft Caribe.

The low spatial and temporal coverage of the oceanographic measurements in the study area and the need to know the waves, currents and tides, and the interaction between them at different points of interest led to the construction of this model.

The Delft 3D modeling platform was used, which is extensively validated for multidimensional simulation of flows and transport phenomena. The model considers at its borders tidal forcing, atmospheric factors, discharges of tributaries and waves from the Atlantic Ocean.

The model results were validated, statistically and qualitatively, for the dry and wet seasons. The good results of the model allow to carry out different experiments aimed to know the performance of the tool to calculate the following:

- Velocities of surface currents.
- Changes in directions and heights of waves.
- Levels of waves.
- Changes in the above mentioned variables due to the passage of cold fronts and hurricanes.

It was observed that the waves in the southern Caribbean come parallel to the trade winds (Northeast to Southwest) from the Lesser Antilles, to the Guajira peninsula continuing toward the Central American coast of Honduras and Nicaragua, and simultaneously turning south to the Gulf of Urabá and the coasts of Costa Rica and Panama.

The significant heights in the model area increased in the dry season and with the passage of storms, with wave heights of:

- 6 m in the zone near Guajira Peninsula-

- 3 m in the Urabá Gulf.
- 3 m in the San Andrés Archipelago zone.

The model simulates, in a coherent manner, the Caribbean Current and Panamá Colombia Gyre. The first comes from the Atlantic entering through the model east border and flows to the Guajira Peninsula, where it turns into the Gulf of Mexico and the second is a gyre flowing from Panama to Colombia, with higher velocities during the wet season when the Caribbean current is less strong.

Keywords: Large-scale mathematical model, Delft 3D, Waves, Tides, Caribbean Sea, Cold Fronts, Hurricanes.

1. INTRODUCCIÓN

Existen relativamente pocas mediciones sobre mareas, corrientes y oleajes a lo largo de los aproximadamente 1600 km de litorales de la costa Caribe colombiana (AGUDELO RESTREPO, PABLO et al., 2005; LONIN, SERGEI y ESCOBAR, CARLOS A., 2009; MESA, OSCAR et al., 2001; MONTOYA RAMÍREZ, RUBÉN D. y OSORIO ARIAS, ANDRÉS F., 2007). La falta de políticas claras y las dificultades para acceder a los datos oceanográficos ya existentes dificulta también la planificación de los numerosos desarrollos urbanos, turísticos, pesqueros y comerciales proyectados para el futuro en la zona.

En circunstancias similares, se han elaborado en el mundo modelos matemáticos de gran escala espacial o “continentales” (*continental models*, en la literatura en inglesa), ejemplificados, entre otros, por el *Dutch Continental Shelf Model* (GERRITSEN, HERMAN et al., 1995) y por el *Continental POLPRED del NOC (National Oceanographic Centre)*, ambos usados en Europa. El *Princeton Ocean Model (POM)* (BLUMBERG, ALAN F. y MELLOR, G.L., 1987), el *Wave-Watch III* (TOLMAN, HENDRIK L., 1989, 2002a, 2002b, 2002c) y el *CaribWAM* (LONIN, SERGEI et al., 1996), han sido utilizados en el mar Caribe para simular los oleajes y las corrientes, en particular los siguientes estudios:

- a) Análisis geostroáficos y estadísticos de los niveles de las mareas (GORDON, ARNOLD L., 1967, WUST, G., 1964),
- b) Seguimientos y medidas de las corrientes con boyas a la deriva (MOLINARI, R.L. et al., 1980).
- c) Caracterizaciones a partir de los armónicos de las mareas meteorológicas (KJERVE, BJÖRN, 1981).
- d) Caracterizaciones de los regímenes extremos del oleaje con base en datos recolectados por los barcos y boyas del programa ICOADS (AGUDELO RESTREPO, PABLO et al., 2005); estos resultados fueron luego reanalizados usando datos del *Wave Watch III* y datos de las boyas en el Caribe (MESA GARCÍA, JULIO CESAR, 2009).

Los estudios mencionados se aplican a zonas profundas (profundidades > 120 m) y no consideran las interacciones entre corrientes, niveles del mar y oleajes de las zonas más “someras” del Caribe, en las cuales los oleajes típicos (longitudes de onda entre 80 m y 120 m) sufren alteraciones muy significativas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Dada la falta de estudios y falencias de mediciones continuas del oleaje en zonas someras, los proyectos “Erosión Costera en Antioquia fase I” y “Erosión costera en la región de Cartagena (Galerazamba - Bocachica), costa Caribe colombiana, módulo oceanografía”, se plantearon como objetivo la construcción de un modelo aplicable a las zonas someras del Caribe colombiano. El modelo tiene en cuenta el oleaje entrante (swell) y las mareas astronómicas en sus fronteras físicas, así como la información sobre vientos y presiones atmosféricas, permitiendo evaluar la influencia de estos sobre el oleaje, las mareas y las corrientes del Caribe, tanto en aguas profundas cercanas de las costas, y en cualquier punto del área de estudio.

Como objetivos específicos se definieron los siguientes:

- La calibración y validación del modelo continental (Delft Caribe) , con base en datos obtenidos por las boyas oceanográficas administradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional en Cartagena (CIOH), y de los mareógrafos en la zona.
- Caracterizar los diferentes patrones de corrientes y oleajes en las zonas someras del Caribe colombiano.
- Establecer las condiciones de oleaje para el 2009 en el golfo de Urabá.
- Verificar cualitativamente si el modelo representa adecuadamente las corrientes principales dentro del área de estudio, y su interacción con el oleaje.
- Determinar las influencias de las tormentas tropicales y de los frentes fríos sobre las características de los oleajes del área de estudio.

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

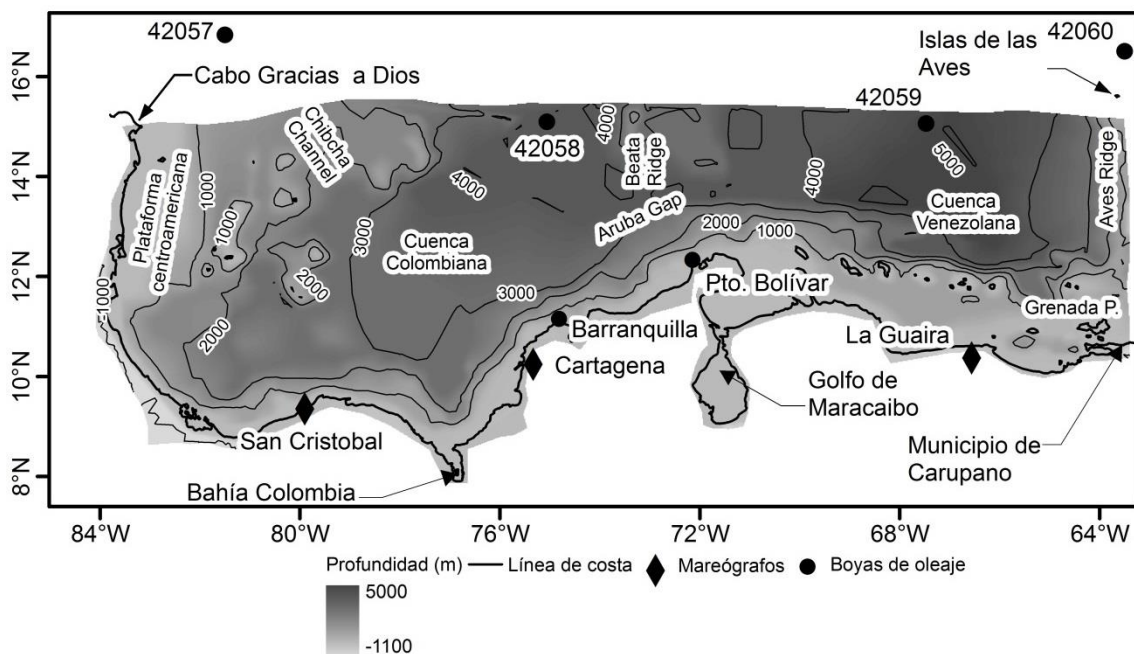


Figura 1.1 Área de estudio, Batimetría general y ubicación de los mareógrafos y boyas direccionales en la zona.

El dominio geográfico del modelo del sur del mar Caribe se extiende, por el noroeste, desde el cabo Gracias a Dios (83°11'W, 15°02'N, Nicaragua) hasta el ridge de la Aves, al noreste de Venezuela (63°33'W, 10°21'N); su límite meridional es la Bahía Colombia, en el extremo sur del golfo de Urabá (76°50'W, 7°54'N) (Figura 1.1). En esta área, fisiográficamente compleja debido a la actividad tectónica de la placa Caribe, existen morfologías muy diversas, incluyendo zonas abisales con profundidades cercanas a los 5000 m, cadenas montañosas submarinas como los ridges de las Aves y el Beata ridge, y canales profundos como el Aruba gap, el Grenada Passage y el Chibcha Channel (Figura 1.1).

El principal forzador del oleaje y de las corrientes superficiales en el mar Caribe son los vientos Alisios. Los Alisios inciden predominantemente desde el noreste y sus cambios de direcciones y velocidades se asocian principalmente a los desplazamientos de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), interpretada como el principal control climático de la zona Caribe (CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS,

2009 a, 2009 b, 2009 c, 2009 d, 2009 e, 2009 f, 2009 g, 2009 h, 2009 i, 2009 j, 2009 k, 2009 l). Durante los meses de diciembre y abril la ZCIT se ubica al sur (entre los 0° y los 5°S), y los Alisios (velocidades entre 8 m/s y 15 m/s) son los vientos predominantes, generando condiciones secas (ANDRADE, CARLOS A. et al., 1983; RESTREPO, JUAN D. y LOPEZ, SERGIO A., 2008).

Entre agosto y octubre la ZCIT se ubica al norte (8°N) del área de estudio, los Alisios pierden su predominio y se posiciona en el Chocó colombiano (al sur del mar Caribe) una zona lluviosa, de mal tiempo, caracterizada por vientos sentido sur – norte que entran una gran cantidad de humedad al golfo de Urabá y a gran parte de la costa Caribe Colombiana (ANDRADE, CARLOS ALBERTO, 1993;) GARCÍA VALENCIA, CAROLINA y SIERRA CORREA, PAULA C., 2007).

Las interacciones vientos-aguas en el Caribe generan dos corrientes superficiales principales, conocidas como la Corriente del Caribe y el Giro de Panamá. La primera transita desde las Antillas menores hacia el noroeste luego de pasar por la Guajira hacia el estrecho de Yucatán, y se une luego a la corriente del Golfo de México. El Giro de Panamá se ubica sobre la parte oeste del Caribe, y con trayectorias ciclónicas fluye entre el golfo de Los Mosquitos y las Islas de San Blas en Panamá; luego transita hacia el norte, paralela al litoral colombiano (Figura 1.2 y Figura 1.3) (ANDRADE, CARLOS ALBERTO et al., 2003).

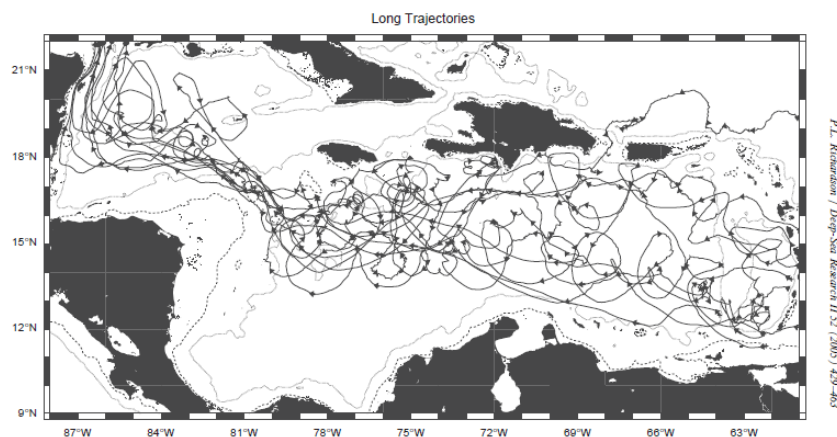


Figura 1.2 Mediciones de la corriente del Caribe (RICHARDSON, P. L., 2005).

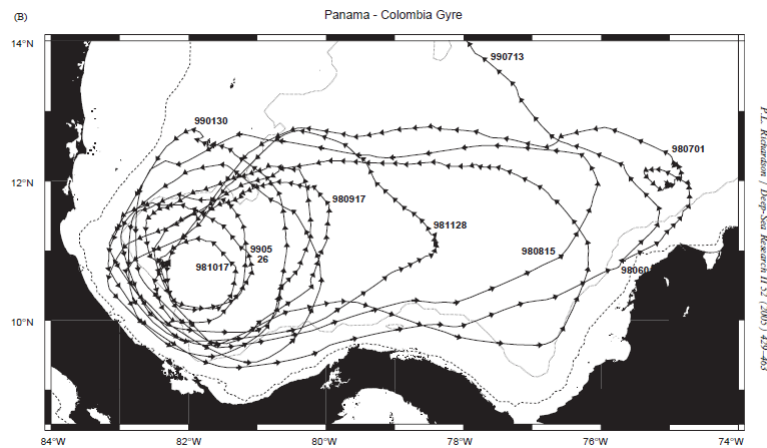


Figura 1.3 Mediciones del giro Panamá - Colombia Caribe (RICHARDSON, P. L., 2005).

Ambas corrientes son forzadas por un patrón complejo de mareas, que tiene por lo menos seis zonas con rangos mareales diferentes (KJERVE, BJÖRN, 1981) y se caracterizan por la presencia de áreas mixtas entre mareas de los tipos diurnas y semi diurnas. En un entorno local, la costa colombiana está dominada por mareas semi diurnas con un rango mareal máximo de 50 cm (INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, 2004). Las mareas en el Caribe son también forzadas por los cambios en la presión atmosférica debidos a los movimientos de la ZCIT y del sistema de presión de las Azores. ((CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS, 2009 a, 2009 b, 2009 c, 2009 d, 2009 e, 2009 f, 2009 g, 2009 h, 2009 i, 2009 j, 2009 k, 2009 l)).

2. ESTADO DEL ARTE

Conocer los trabajos anteriores de otros autores sobre análisis con fines similares a los de esta tesis ayuda a entender el problema y a crear un marco teórico fuerte, sobre el que se apoyan los objetivos de este proyecto. A continuación, se presenta un recuento sobre los modelos continentales usados en algunas partes del mundo, y una descripción de las metodologías de análisis del oleaje y las mareas en el mar Caribe.

Los modelos continentales (o de gran escala, que incluyen grandes distancias de cientos de kilómetros) son utilizados para entender las interacciones clima-océano, y sirven como base para extrapolar las condiciones oceanográficas típicas de áreas con extensiones mayores hasta sectores localizados en zonas de interés práctico y que no cuentan con informaciones sistemáticas sobre las condiciones de aguas someras.

En la actualidad es posible simular el oleaje en el sur del mar Caribe usando diferentes modelos numéricos de gran escala que simulan la propagación del oleaje desde zonas remotas hasta la costa. Este es el caso del *Wave-Watch III* (TOLMAN, HENDRIK L., 1989, 2002a, 2002b, 2002c) y del *CaribWAM* (LONIN, SERGEI et al., 1996), ambos con capacidad de simular condiciones de oleaje en aguas profundas. El *Wave Watch III* tiene celdas espaciales de $1,25^\circ$ y el *CaribWam* de 20 km, valores espacialmente muy amplios que dificultan la buena resolución en zonas costeras someras.

Las características de los oleajes del Caribe también han sido inferidas con base en datos visuales reportados por barcos mercantes y por las boyas del programa *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Project* ICOADS (DIAZ, H et al., 2002), derivado del programa COADS para Estados Unidos (SLUTZ, R. J. et al., 1985, WOODRUFF, S.D. et al., 1987). Los datos ICOADS no están uniformemente distribuidos, ya que la información espacial se concentra en las rutas de los barcos. Sin embargo, por medio de ecuaciones estadísticas que relacionan el oleaje visual y el real es posible determinar las alturas significativas (H_s) y los periodos al pico (T_p) del oleaje, incluso durante tormentas tropicales y huracanes, ejemplo la determinación del oleaje extremal en el Caribe colombiano presentada por AGUDELO RESTREPO, PABLO (2005).

Las anteriores metodologías para el cálculo del oleaje fueron utilizadas en conjunto en la metodología del re-análisis de series de oleaje del caribe colombiano (MESA GARCIA, JULIO CÉSAR, 2009). El estudio que se acaba de mencionar calcula el oleaje en el Caribe colombiano en zonas de aguas profundas, mejorando la fiabilidad de las anteriores por si solas, sobre todo en el cálculo del clima medio del oleaje.

Las corrientes y las mareas del mar Caribe se han analizado con múltiples metodologías, como los modelos geostróficos (GORDON, ARNOLD L., 1967, WUST, G., 1964), los seguimientos y medidas de las corrientes con boyas a la deriva (MOLINARI, R. L. et al., 1980), y fueron calculados los armónicos de las mareas, con el fin de caracterizar las mareas astronómicas en todo el Caribe (KJERVE, BJÖRN, 1981).

El mar Caribe también ha sido modelado con el *Princeton Ocean Model* (POM) (BLUMBERG, ALAN F. y MELLOR, G. L., 1987), que es un modelo continental en tres dimensiones con celdas entre 2 y 15 km. Que permitió evaluar la continuidad de la contra corriente de Panamá hasta pasar por la península de la Guajira. Sus resultados fueron validados con transeptos de correntómetros Doppler tipo ADCP (*Acoustic Doppler current profiler* por sus siglas en ingles) y con mediciones de salinidad y temperatura realizadas con CTD (*conductivity, temperature, and depth* por sus sigla en inglés) (ANDRADE, CARLOS ALBERTO et al., 2003). A partir de los resultados del POM se han planteado mecanismos para el análisis de los remolinos que interactúan con la corriente del Caribe (CARTON, JAMES A. y CHAO, YI, 1999), la cual entra por las Antillas menores, y viaja por las cuencas de Venezuela y Colombia hasta salir por el estrecho de Yucatán.

Los modelos anteriores, cada uno con funciones diferentes, han aportado al entendimiento de las condiciones oceanográficas del mar Caribe. Sin embargo, ninguno se ha usado para simular al tiempo y en detalle las condiciones de las zonas de aguas someras y aguas profundas. Tampoco, se ha tenido en cuenta la interacción entre las olas y las corrientes en el área de estudio.

Como un desarrollo posterior al Delft Caribe presentado en esta tesis, se realizó una variante del modelo, con cambios en la estratificación y un primer acercamiento a la creación a una malla en tres dimensiones en coordenadas geográficas con acercamientos

a la representación de los cambios termo - halinos realizada por (RUIZ SARRAZOLA, 20015)

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL DELFT-CARIBE

En este capítulo se explica el funcionamiento teórico y numérico del modelo, y cómo la plataforma Delft 3D calcula las mareas y el oleaje, y sus interacciones espacio temporales.

3.1 ASPECTOS FÍSICOS Y NUMÉRICOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS MAREAS, LAS CORRIENTES Y EL OLAJE

La plataforma Delft 3D es un sistema multidimensional (2D y 3D) para la simulación hidrodinámica, que se utilizó para realizar la modelación del oleaje, las mareas y las corrientes, y la interacción entre estas al sur del mar Caribe. El módulo Flow del Delft 3D soluciona, con un esquema numérico de diferencias finitas sobre una malla curvilínea, las ecuaciones de continuidad (3.1) y (3.2) conservación del momentum (3.3). Y calcula los niveles del mar, las velocidades y los esfuerzos en el fluido, influenciados todos por: la rugosidad del fondo, las mareas astronómicas, los oleajes, los gradientes de presión atmosférica, las velocidades del viento y las descargas de los ríos en sus fronteras espaciales.

3.1.1 Ecuación de Continuidad.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (3.1)$$

dónde:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma \quad (3.2)$$

Q = Caudal total entrante o saliente por unidad de área, debido a las descargas o entradas de agua como: ríos, corrientes, precipitaciones y a la evaporación.

q_{in} y q_{out} = Fuentes y pérdidas de agua locales por unidad de volumen

H = Profundidad total del agua

$\sigma = (z - \zeta)/H$ Coordenada sigma vertical escalada

z = Coordenada vertical en el espacio físico

ζ = Elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia.

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = Coeficientes para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares.

ξ y η = Coordenadas horizontales curvilíneas

U = Velocidad del flujo en la dirección ξ

V = Velocidad del flujo en la dirección η

3.1.2 Conservación del Momentum lineal.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_u \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

(3.3)

donde:

ω = Velocidad del fluido en la dirección z

σ = Coordenada vertical escalada

ν_V = Vorticidad vertical

ρ_0 = Densidad de referencia del agua

f_u y f_v = Fuerzas de Coriolis

P_ξ y P_η = Gradientes de presión

F_ξ y F_η = Representan el desequilibrio de los esfuerzos horizontales de Reynold

M_ξ y M_η = Fuerzas externas

El modelo del Caribe es un modelo bidimensional en el cual las ecuaciones de conservación de la masa y del momentum lineal desprecian los términos no hidrostáticos para el cálculo de las velocidades. En otras palabras, se promedian las variaciones de la velocidad en la columna de agua en cada una de las celdas. Las velocidades del flujo promediadas en la columna de agua son influenciadas por los esfuerzos cortantes en el fondo, definidos por la siguiente ecuación:

$$\vec{\tau b_{2D}} = \frac{\rho_0 \vec{u} |\vec{u}|}{C_{2d}^2} \quad (3.4)$$

$\vec{\tau b_{2D}}$: Vector de esfuerzos cortantes en el fondo.

ρ_0 : Densidad del agua.

\vec{u} : Velocidad del flujo promediada en la altura.

$|\vec{u}|$: Magnitud del vector de velocidad del flujo promediada en la altura.

C_{2d} : Coeficiente de rugosidad del fondo en 2 dimensiones (Coeficiente de Chézy).

Para el modelo las rugosidades del fondo fueron definidas con coeficientes de Manning, los cuales el Delft 3D convierte al coeficiente de Chézy por medio de la siguiente relación:

$$C_{2d} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (3.5)$$

H : Altura del flujo.

n : Coeficiente de Manning.

Y a la vez, la columna de agua también se ve afectada por los esfuerzos cortantes producidos por el viento, definidos así:

$$|\vec{\tau_s}| = \rho_a C_d \overline{U_{10}} |\overline{U_{10}}|$$

(3.6)

$|\overline{\tau_s}|$: Esfuerzo cortante en la superficie del agua.

ρ_a : Densidad del aire.

C_d : Coeficiente de dragado.

$\overline{U_{10}}$: Vector de la velocidad del viento a 10 m de altura.

$|\overline{U_{10}}|$: Magnitud del vector de la velocidad del viento a 10 m de altura.

La ecuación del momentum incluye todas las fuerzas externas (los vientos y el oleaje), y da como resultado define los patrones de corrientes, y los gradientes de densidad de energía del oleaje.

3.1.3 Ecuación de la densidad de energía del oleaje.

El oleaje en el SWAN se calcula con la ecuación de balance de densidad de energía del oleaje, en la que el cambio en el espectro del oleaje (N) se iguala a la densidad de energía de la ola (E) dividida por la frecuencia relativa del oleaje. En este último término se representan los efectos de la generación y disipación del oleaje, y la interacción no lineal entre las olas (WL|DELFT HYDRAULICS, 2009).

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.7)$$

Del desarrollo de la ecuación (3.7) se obtiene la ecuación de ola o de balance de acción en coordenadas cartesianas (HASSELMANN, KLAUS y HASSELMANN, SUSSANE, 1981):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.8)$$

de izquierda a derecha, los términos de la ecuación anterior representan:

- El cambio en la densidad del espectro en el tiempo (primer término).
- Los cambios en la densidad del espectro en las direcciones cartesianas x y (segundo y tercer término) respectivamente, donde c_x y c_y son las velocidades de propagación en las dos direcciones.
- El cambio en la frecuencia relativa (cuarto término) debido a las variaciones de profundidad y las corrientes (c_σ es la velocidad en el espacio de las frecuencias relativas).
- El cambio del espectro en el espacio de las direcciones del oleaje (c_θ es la velocidad en el espacio de las direcciones, quinto término).

En el lado derecho de la ecuación anterior, el término S representa la sumatoria de las fuentes de energía del oleaje, incluyendo las pérdidas de en energía:

$$S = S_{in} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} + S_l \quad (3.9)$$

donde:

- S_{in} es la energía suministrada por el viento.
- Los términos $S_{ds,w}$, $S_{ds,bb}$ y $S_{ds,br}$, representan respectivamente la disipación de energía debido al descrestamiento de las olas, a la fricción con el fondo y la rompiente por el cambio en la profundidad.
- S_l es el cambio en la energía debida a la cuádruple interacción de olas en aguas profundas o la triple interacción del oleaje en aguas someras.

Al calcular los esfuerzos generados, el acople bidireccional de los módulos Flow y Wave de Delft 3D simula la interacción entre las olas y las corrientes. Estas interacciones generan cambios en el campo de velocidades de la superficie del agua, y a la vez en las características del oleaje.

Los efectos de las corrientes sobre el oleaje se describen dividiendo el momentum en la dirección del oleaje por su periodo, como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \dots + \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} = F_j$$

(3.10)

donde i y j corresponden a los ejes coordenados relativos a la dirección del oleaje.

La componente media de la velocidad está dada por \bar{u}_j , ζ que es la elevación del agua por encima de la superficie media del agua, $\bar{\tau}_{ij}$ son los esfuerzos cortantes medios y F_j es la fuerza que queda luego de promediar el momentum sobre el periodo del oleaje. Esta ecuación se presenta de manera genérica como el gradiente de las fuerzas generadas por el oleaje o *radiation stress* por su terminología en inglés:

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} = F_i = \frac{Dk_i}{\omega}$$

(3.11)

donde la variación de los espectros del oleaje en el espacio se igualan a las componentes de la fuerza del oleaje y a las tasas de disipación de la energía debida al oleaje, multiplicada por el número de ola sobre la frecuencia del oleaje (DINGEMANS, M. W. et al., 1987).

La ecuación (3.11) funciona bien para aguas profundas. Sin embargo, al entrar en aguas someras las olas se deforman, y se generan desplazamientos netos de partículas en la dirección de propagación (flujos de Stokes), acompañados por corrientes paralelas a la costa y en algunos casos paralelas al oleaje. Estos fenómenos se consideran en el módulo Flow del Delft 3D, el cual incorpora las fuerzas de las olas calculadas a partir de la información proporcionada por el módulo Wave del Delft 3D.

3.1.4 Solución numérica

El Delft-3D utiliza las condiciones de frontera del modelo como forzadores para calcular la solución numérica de las ecuaciones de conservación de la masa y del momentum.

Para lo anterior se emplea un algoritmo de diferencias finitas, basado en el esquema de solución implícito de integración temporal de Crank Nicholson (CRANK, J. y NICOLSON, P., 1947). Este método es incondicionalmente estable, pero puede ser muy lento para converger, por lo cual su tiempo de convergencia se mejora con un algoritmo de integración

temporal con precisión de segundo orden, del tipo ADI (*Alternating Direction Implicit* o Dirección Implícita Alternada) (LEENDERTSE, JAN J., 1967, LEENDERTSE, JAN J. et al., 1973, LEENDERTSE, JAN J. y GRITTON, EUGENE C. , 1971).

El algoritmo ADI resuelve las ecuaciones de momentum y continuidad, y calcula la velocidad en X y los niveles del mar con el esquema implícito de Crank Nicholson, medio paso en el tiempo hacia adelante. Luego explícitamente calcula la velocidad en Y, para el medio paso siguiente. Así se garantiza una alta convergencia con un costo computacional bajo (Ver las siguientes ecuaciones).

Primera etapa:

$$\frac{\bar{U}^{l+\frac{1}{2}} - \bar{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \bar{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y \bar{U}^l + B \bar{U}^{l+\frac{1}{2}} = \bar{d} \quad (3.12)$$

Segunda etapa:

$$\frac{\bar{U}^{l+1} - \bar{U}^{l+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \bar{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y \bar{U}^{l+1} + B \bar{U}^{l+1} = \bar{d} \quad (3.13)$$

Con:

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

donde:

- U momentum.
- l instante en el tiempo.
- Δt intervalo temporal de cálculo.
- d son los forzadores externos como el viento y las presiones atmosféricas.
- f son las fuerzas de Coriolis.
- u y v las componentes de la velocidad.
- H la profundidad del flujo
- λ el coeficiente de fricción del fondo.

Por otro lado, el cálculo de la densidad de energía del oleaje, se hace con un planteamiento de diferencias finitas hacia adelante para los cambios geográficos del espectro, y de diferencias finitas al medio para los cambios en el espacio de las frecuencias y de las direcciones, como se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{[C_x N]_{i_x} - [C_x N]_{i_x-1}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^n + \left[\frac{[C_y N]_{i_y} - [C_y N]_{i_y-1}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^n \\
 & + \left[\frac{(1 - \vartheta)[C_\sigma N]_{i_\sigma+1} + 2\vartheta[C_\sigma N]_{i_\sigma} - (1 + \vartheta)[C_\sigma N]_{i_\sigma-1}}{\Delta \sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\theta}^n \\
 & + \left[\frac{(1 - \eta)[C_\theta N]_{i_\theta+1} + 2\eta[C_\theta N]_{i_\theta} - (1 + \eta)[C_\theta N]_{i_\theta-1}}{\Delta \theta} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma}^n = \left[\frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^{n*}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

donde:

$i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta$: Son los contadores de la malla en diferencias finitas.

$\Delta x, \Delta y, \Delta \sigma$ y $\Delta \theta$: Son los espaciamentos en cada una de las variables.

n: el índice de iteración

n^* : es igual a n o n-1 para garantizar un esquema implícito de solución.

ϑ y η : son dos factores que, si son iguales a 0, la solución en el espacio de las frecuencias y las direcciones se calcula con un esquema central de diferencias finitas, con una difusión mucho mayor a 0 y una muy buena precisión (menor costo computacional). Si los dos valores son iguales a 1, el esquema es en diferencias finitas hacia adelante, un esquema más difusivo y menos preciso, pero muy robusto por ser convergente.

El Delft 3D reconoce automáticamente los espectros negativos que se pueden producir del esquema central de diferencias finitas ($\vartheta = 0$ y $\eta = 0$) para las soluciones en los espacios de las frecuencias y las direcciones, por lo que los vuelve cero y los analiza con el esquema implícito de diferencias hacia adelante ($\vartheta = 1$ y $\eta = 1$). Lo anterior garantiza la convergencia de los resultados, hecho muy útil cuando existen intervalos de tiempo largos para el cálculo del oleaje.

Los intervalos temporales en la solución de las ecuaciones diferenciales parciales para el cálculo de las corrientes y del oleaje son importantes, porque generan costos computacionales e imprecisiones importantes. Por lo tanto, estos intervalos deben ser analizados y elegidos en pro de la precisión del modelo y el costo computacional.

Como resumen del funcionamiento numérico del modelo, se presenta un diagrama de flujo que ayuda a entender el proceso de cálculo:

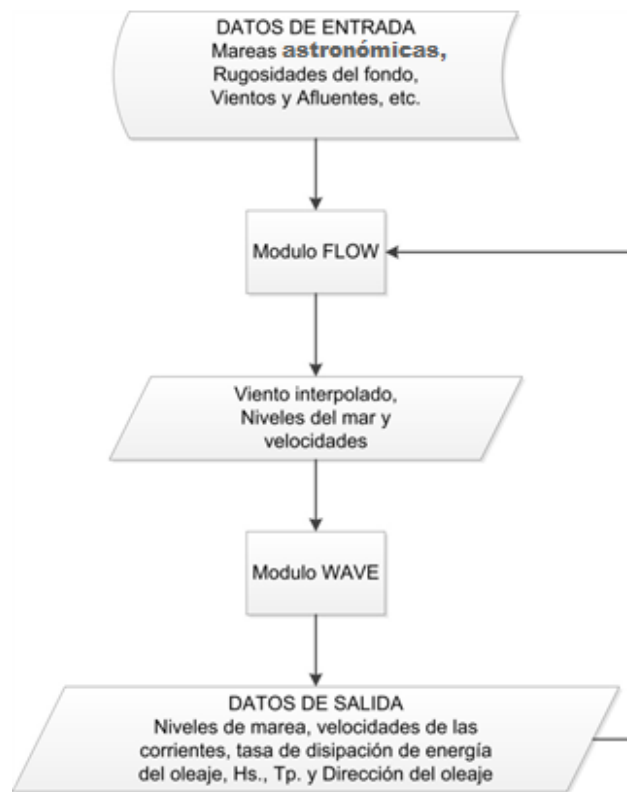


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de modelación acoplado entre los módulos Flow y Wave del Delft 3D.

3.2 LA MALLA DEL MODELO Y LOS PARÁMETROS DE ENTRADA

La construcción del modelo matemático del Caribe comenzó por la elaboración de una malla curvilínea, la cual sigue los patrones batimétricos y topográficos dentro del dominio de cálculo. Este dominio está discretizado espacialmente por una malla curvilínea de 68 000 celdas, cuyos tamaños varían entre 1,5 km en cercanías a la línea de costa y 7,5 km en las zonas remotas (Ver Figura 3.2), lo cual permitió que las celdas de menor tamaño contuvieran por lo menos un pixel de la imagen del *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), y que el oleaje y las corrientes fueran afectadas por la rugosidad y forma del fondo, el cual este último contiene celdas en dentro de las zona emergidas con la capacidad de ser inundadas.

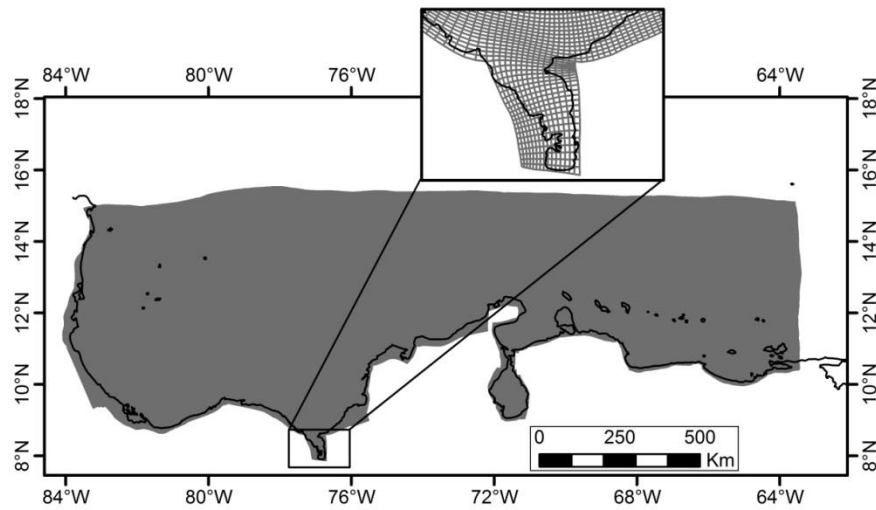


Figura 3.2 Malla curvilínea del modelo.

Después de la construcción de la malla, fueron seleccionados parámetros físicos que en pruebas iniciales arrojaron resultados coherentes y fueron obtenidos de información de estudios similares, y que se asumieron acertados para comenzar con el análisis de sensibilidad, los cuales se presentan a continuación en la tabla Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Parámetros físicos y numéricos para las primeras simulaciones.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del agua	1030	kg/m ³
Densidad del aire	1	kg/m ³
Coeficiente de dragado del viento a 0 m/s	0,00063	
Coeficiente de dragado del viento a 100 m/s	0,0723	
Rugosidad n en las dos direcciones	$n = 0,03$ si $Profundidad \geq 100\text{ m}$ $n = 0,025$ si $100\text{ m} > Profundidad \geq -1\text{ m}$ $n = 0,1$ si $-1\text{ m} < Profundidad$	
Viscosidad de remolino	1	m ² /s
Número de celdas en la malla	68000	
Intervalo de tiempo modelo hidrodinámico	3	min
Intervalo de tiempo del módulo de oleaje	3	horas
Tiempo de calentamiento del modelo hidrodinámico	15	días

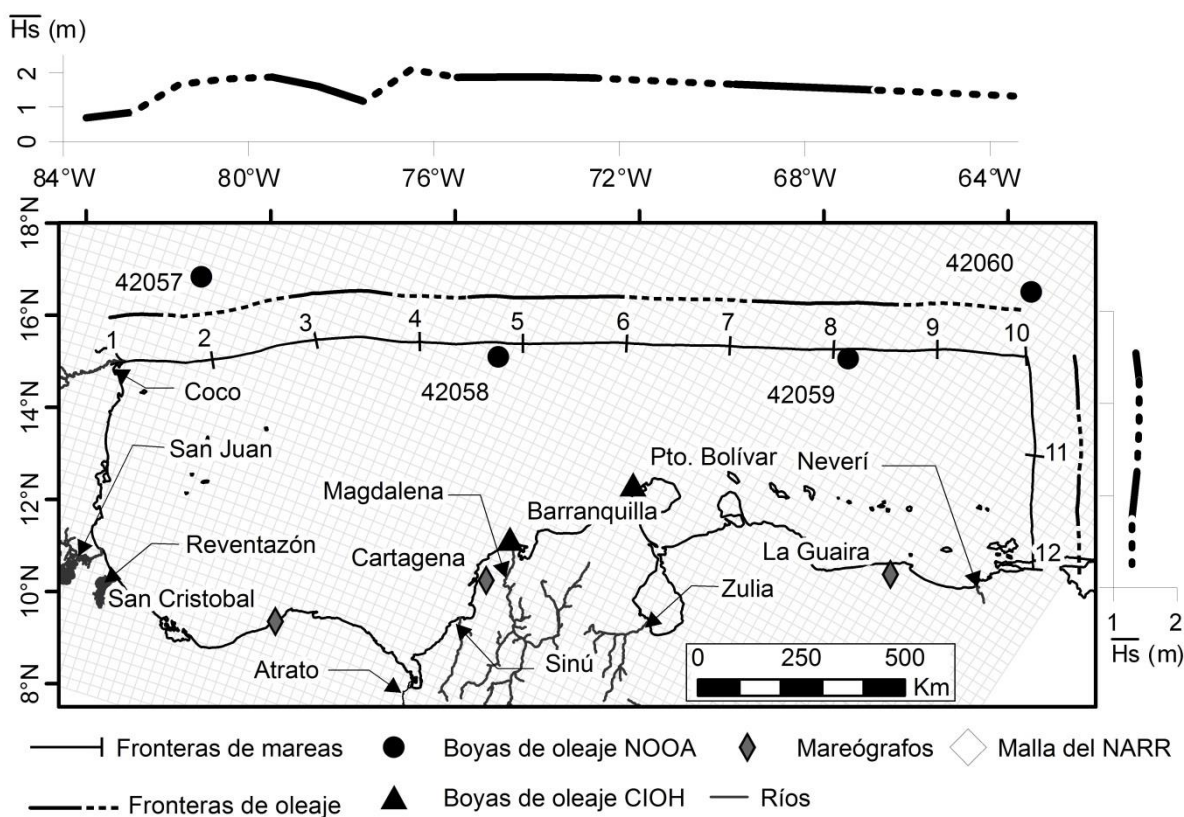
Variables como la rugosidad del fondo, la viscosidad de remolino horizontal, los coeficientes de dragado del viento y los intervalos temporales de cálculo de las corrientes y el oleaje fueron evaluados en el análisis de sensibilidad del modelo y posteriormente calibrados, hasta encontrar la combinación ideal de todos estos, que garantizara una precisión adecuada y un costo computacional apropiado.

Algunos de estos parámetros simplemente se dejaron con los valores que trae por defecto el Delft 3D, debido a que en las pruebas iniciales se observaron variaciones nulas o generaban variaciones muy cercanas a cero en los niveles de mareas, y en las alturas y direcciones del oleaje.

4. FUENTES DE INFORMACIÓN

En este capítulo se describen de forma detallada los procesos realizados para la obtención de las series de oleaje y mareas, que hacen parte de las condiciones de frontera, y fueron necesarias para los procesos de calibración y validación del modelo.

Lo anterior acompañado de una explicación completa de los procedimientos y herramientas desarrollados para la introducción de las condiciones de frontera en el modelo, presentadas en la Figura 4.1.



4.1 TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La morfología del Caribe es representada en el modelo por la batimetría y una franja terrestre de 5 km. Esta información restringe el modelo en la profundidad, y es una frontera

física que limita el desplazamiento de los flujos. La batimetría del modelo fue obtenida del programa GEBCO que tiene una resolución cercana a un minuto (longitud - latitud); esta fue complementada con una franja terrestre de 5 km de topografía que proviene de las imágenes de la misión SRTM. Utilizando el programa Arc GIS se convirtieron estas imágenes en puntos, para que la información fuera compatible con el Delft 3D, lo que permitió recrear la línea de costa, la cual es seguida por la malla curvilínea del modelo.

4.2 AFLUENTES

Los afluentes afectan la hidrodinámica local de algunas zonas del Caribe y, por esta razón, se incluyeron los caudales medios multianuales de los principales ríos que descargan en el área de estudio; estos se obtuvieron de la base de datos de la *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) (“UNESCO. 2002. Monthly Discharge Data for World Rivers” except former Soviet Union). Y se utilizó la información de los caudales medios de las bocas del río Atrato obtenidos de ROLDÁN, PAOLA ANDREA (2008) (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Caudales de los principales afluentes.

Río	Caudal (m ³ /s)	Río	Caudal (m ³ /s)
Sinú, Colombia	550	Atrato-Coco Grande	165
Coco, Nicaragua	70	Atrato-Tarena	211
Neverí, Venezuela	32	Atrato-Roto	2388
Zulia, Venezuela	54	Atrato-Leoncito	183
Magdalena, Colombia	7317	Atrato-Urabá	183
Reventazón, Nicaragua	113	Atrato-Matuntugo	281
San Juan, Costa Rica	420	Atrato-Pavas	116

4.3 MAREAS ASTRONÓMICAS

Las fronteras permeables o abiertas del modelo donde el Caribe interactúa con otros cuerpos de agua al norte y al este, son largas (2750 km aproximadamente), y en toda su extensión los niveles del agua varían con la interacción gravitacional de los océanos con los astros cercanos (la Luna y el Sol).

Con el fin de considerar la variación espacial de las mareas se dividieron las fronteras en 11 tramos de 250 km, donde con el programa *Tide Model Driver* (TMD) (EGBERT, GARY D. y EROFEEVA, LANA, 2002) fueron calculadas 13 componentes de marea para cada uno de los límites geográficos de las fronteras; estas componentes se especifican a continuación:

Tabla 4.2 Constituyentes de marea y sus periodos (T).

Anuales	T horas solares	Origen
Mf	327,859	Componente lunar principal quincenal
MM	661,309	Componente lunar principal mensual
Diurnas		
Q1	26,870	Componente lunar elíptica principal
P1	24,067	Componente solar principal
O1	25,820	Componente lunar principal
K1	23,930	Componente por la declinación lunar-solar
Semidiurnas		
N2	12,660	Componente lunar elíptica principal
M2	12,420	Componente lunar principal
S2	12,000	Componente solar principal
K2	11,970	Componente por la declinación lunar-solar
Aguas someras		
MN4	6,269	
M4	6,210	Componente lunar principal cuatridiurna
MS4	6,103	

Para cada uno de los segmentos de las fronteras norte y oriental (ver Figura 4.1), el modelo hidrodinámico del mar Caribe utiliza los valores de amplitud y fase de cada una de las constituyentes de mareas de la Tabla 4.2, las cuales varían espacialmente como se puede observar en la siguiente figura:

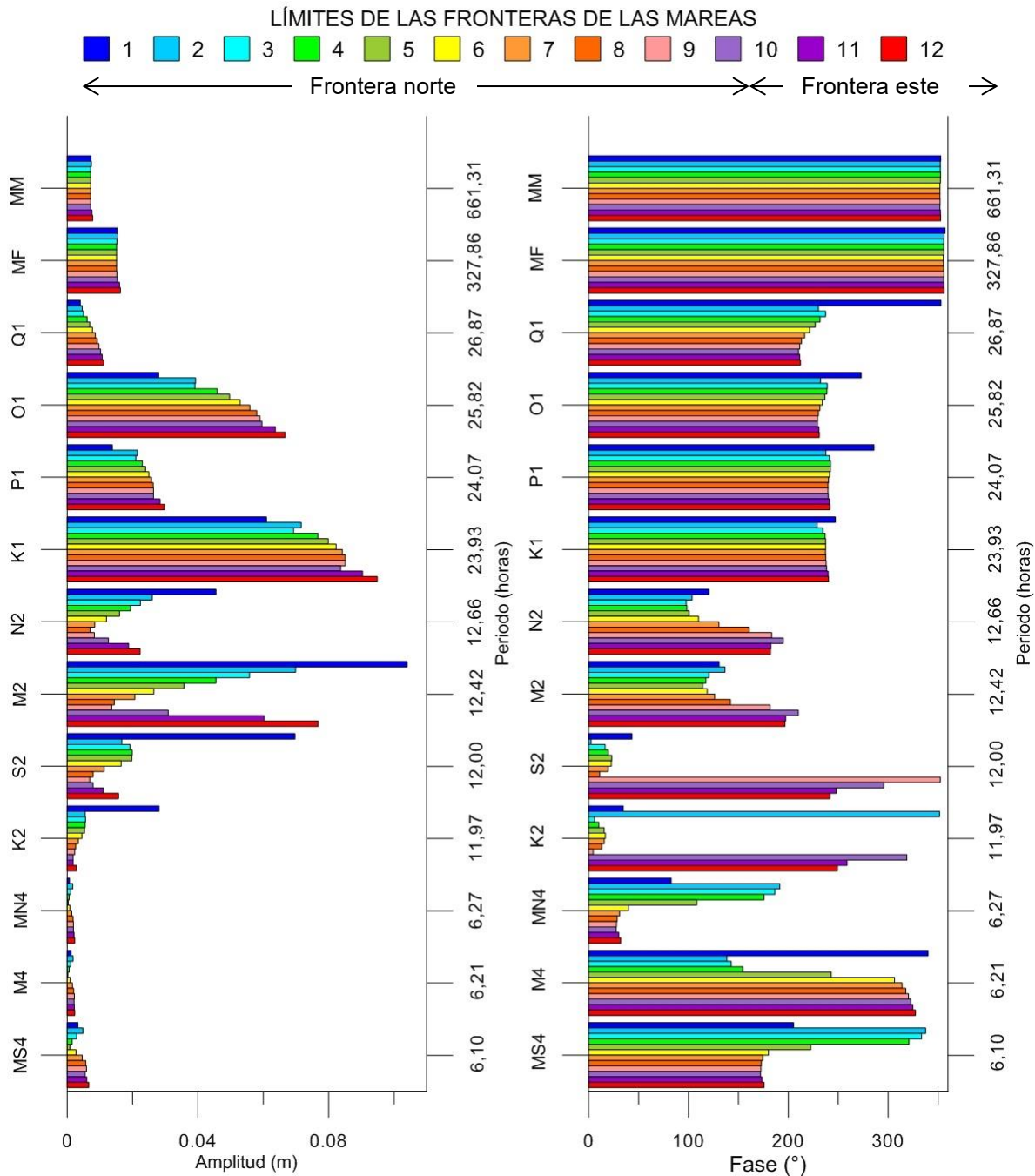


Figura 4.2 Constituyentes de marea en las fronteras del modelo.

En la gráfica anterior, es posible ver como las amplitudes de las constituyentes diarias disminuyen hacia el este, y como las amplitudes de las semidiurnas disminuyen hacia el noreste. Así como las fases de las constituyentes semidiurnas aumentan hacia el sureste (Figura 4.1 y Anexo A). Estos cambios en las mareas se dan gracias a los puntos

anfibrómicos de las mareas en el caribe y la afectación que sufren estas al pasar por los diferentes estrechos (KJERVE, BJÖRN, 1981), cercanos a las fronteras del modelo.

4.4 OLEAJE ENTRANTE (SWELL)

En la frontera norte del modelo fueron introducidos los datos de las alturas significativas, el periodo al pico y la dirección del swell de las boyas de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) en el Caribe central (Figura 4.3 y Figura 4.4).

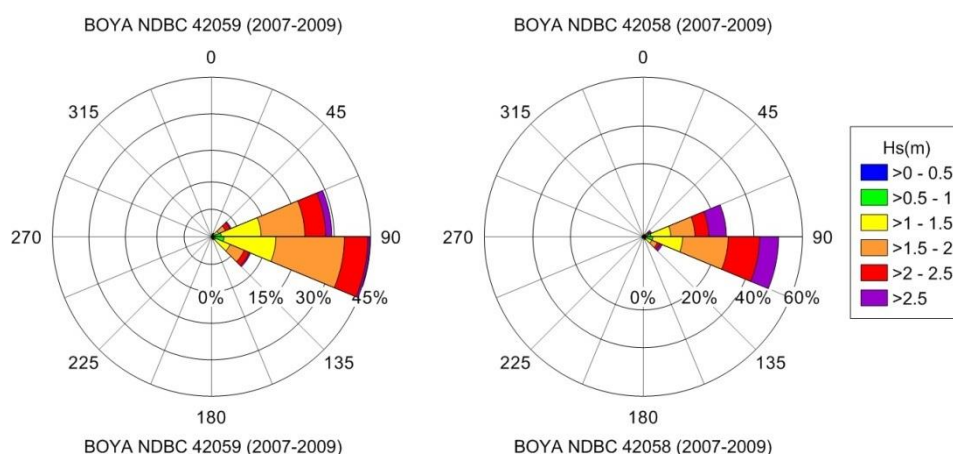


Figura 4.3 Rosas de alturas significativas entre 2007 y 2009 al norte del modelo.

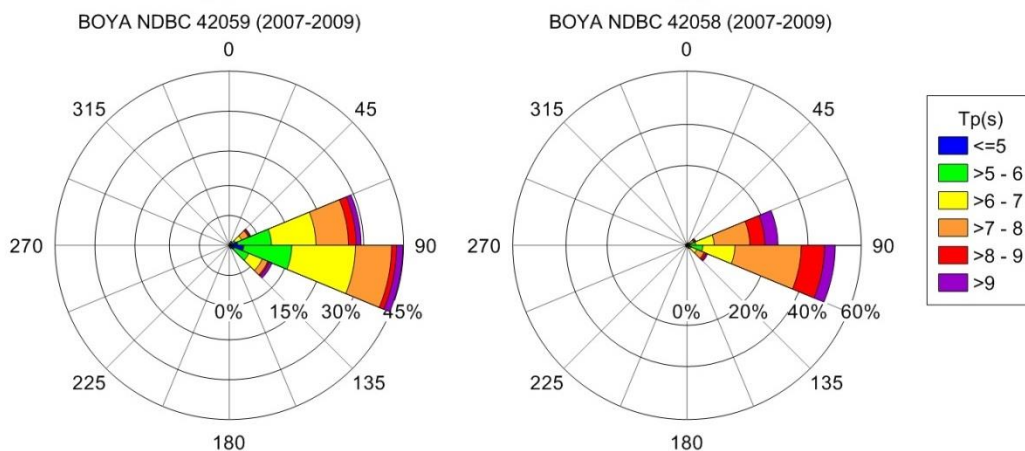


Figura 4.4 Rosas de los períodos al pico entre 2007 y 2009 al norte del modelo.

La información de las boyas *National Data Buoy Center* (NDBC) 42059 (15,05° N; 67,47° O) y NDBC 42058 (15,09° N; 75,06° O), fue utilizada según la disponibilidad de los datos; para algunas simulaciones realizadas entre agosto y septiembre de 1994 se utilizaron los

datos de la boya de la NDBC 41018 (15° N; 75° O), que no tenía la dirección del oleaje, por lo que no se presentan las rosas de oleaje de esta.

En la etapa final de este trabajo, se complementó con la información publicada por el Wave Watch III. En la Figura 4.1 se presentan los valores medios del oleaje hallados con los datos desde el año 2005 al 2011.

4.5 VIENTOS Y PRESIONES ATMOSFÉRICAS

Las presiones atmosféricas y los vientos en el Caribe varían con los movimientos de la zona de convergencia intertropical, los cambios en la topografía, los frentes fríos y los huracanes. Las presiones atmosféricas y los vientos a la vez modifican los niveles de las mareas y fuerzan las corrientes superficiales y el oleaje.

Esta información fue obtenida del North American Regional Reanalysis (NARR por sus siglas en inglés) para los diferentes periodos de tiempo simulados, y luego introducida en el modelo en la frontera superior o atmosférica, como una malla rectangular con celdas de 0,25° y variabilidad temporal de 3 horas, cubriendo la totalidad del dominio (Figura 4.5). Los vientos y presiones atmosféricas después fueron interpolados por el módulo Flow del Delft 3D a la malla de cálculo presentada en la Figura 3.2.

La información del NARR es publicada en formato netCDF para todo el hemisferio norte, por lo que se desarrolló una rutina en Matlab para extraer la información del área de estudio y convertirla al formato adecuado para que el modelo del Caribe interpole estos datos en la malla hidrodinámica. (Véase el manual y el algoritmo en el Anexo B).

En la Figura 4.5, se muestra como la malla rectangular de vientos y presiones atmosféricas excede la cobertura del área de estudio, lo cual es conveniente para mejorar la interpolación de estas variables dentro de la malla hidrodinámica.

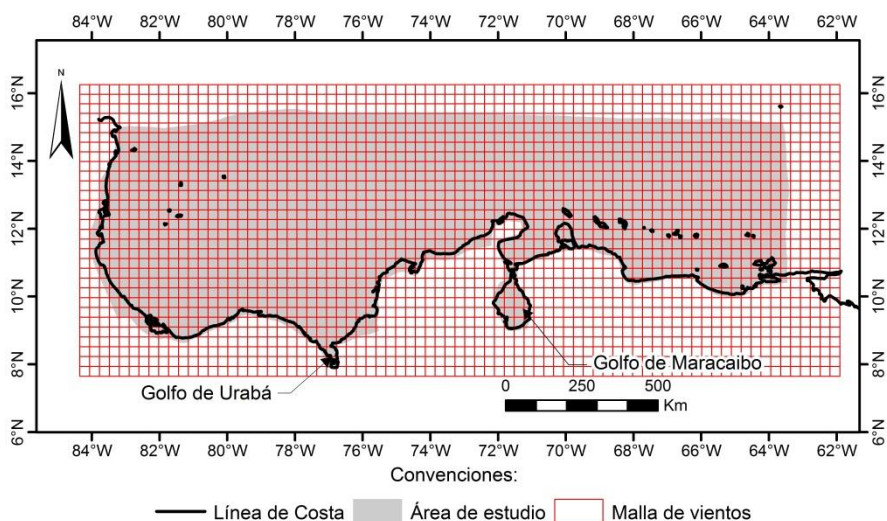


Figura 4.5 Malla atmosférica sobre el área de estudio.

4.6 BOYAS Y MAREÓGRAFOS DENTRO DEL MODELO

Fuera de la información de entrada, en el proceso de calibración y validación del modelo continental fueron utilizados los datos presentes en la dirección <http://www.ndbc.noaa.gov/> de la NOAA de las boyas del CIOH ubicadas al noroccidente de Bocas de Ceniza cerca de Barranquilla ($11^{\circ}09'41.00''\text{N}$; $74^{\circ}40'51.00''\text{W}$) y cerca de Puerto Bolívar en la Guajira ($12^{\circ}21.06'\text{N}$; $72^{\circ}13.067'\text{W}$), las cuales se encuentran dentro del área del modelo (ver Figura 4.1).

Las mareas fueron calibradas y validadas con la información de los mareógrafos de San Cristóbal en Panamá, Cartagena en Colombia y La Guaira en Venezuela, obtenidas de la información publicada UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) y que también están dentro del área del modelo (ver Figura 4.1).

5. METODOLOGÍA GENERAL

En este capítulo se explican los procedimientos generales y pruebas estadísticas realizados en cada uno de los pasos de la construcción del modelo.

El primer paso en la creación del modelo del sur del mar Caribe fue la construcción de una malla curvilínea (celdas 1,5 km a 7,5 km) que sirvió para realizar los cálculos hidrodinámicos y de oleaje. Sobre la malla se interpolaron las presiones atmosféricas y los vientos, y fueron introducidos los parámetros de entrada, como se dijo en el capítulo anterior. Luego fue realizado el análisis de sensibilidad a los parámetros de entrada numéricos y físicos del modelo; esto se llevó a cabo modificando una variable a la vez con la intención de conocer la influencia de esa modificación en los resultados del modelo.

En el análisis de sensibilidad, se realizaron simulaciones de las épocas seca (15 de diciembre de 2008 a 31 de enero de 2009) y húmeda (1 de octubre a 15 de noviembre de 2009) en el Caribe, acompañadas de simulaciones del mes de agosto de 1994, temporadas durante las cuales se contaba con información de las condiciones de frontera y mediciones del oleaje y los niveles de marea, lo cual fue útil después para el proceso de calibración de las variables.

En el análisis de sensibilidad se realizaron simulaciones con modificaciones de los valores de:

- Los intervalos numéricos de cálculo tanto del oleaje como de la hidrodinámica.
- Los coeficientes de dragado del viento.
- Las rugosidades del fondo.
- Las viscosidades de Remolino.

Las variables anteriores, fueron elegidas debido a la dificultad para obtenerlas a partir de mediciones, y a que en simulaciones iniciales se observaron cambios en los resultados de las mareas y el oleaje (ver numeral 6). Los resultados del análisis de sensibilidad fueron comparados utilizando pruebas F y T entre las series de tiempo obtenidas en diferentes puntos de control, con el fin de conocer si las series tenían varianzas y medias iguales; si

estos indicadores diferían estadísticamente, los parámetros de entrada que generaban las diferencias se consideraron como candidatos a ser calibrados.

Ya con los parámetros por calibrar elegidos, se llevaron a cabo una serie de comparaciones de los resultados de las simulaciones del análisis de sensibilidad con respecto a los datos medidos de altura significativa, periodo al pico y dirección del oleaje en las boyas del CIOH en Barranquilla y Puerto Bolívar en los meses de diciembre de 2008 a enero 2009. Este procedimiento fue realizado para las variables que afectaban los niveles de marea, comparando los resultados con los datos medidos por los mareógrafos de Cartagena, La Guaira y San Cristóbal en septiembre de 1994, época elegida debido a la disponibilidad de información en los tres sitios.

Esta afinación de los parámetros físicos se hizo buscando obtener las menores diferencias con respecto a las mediciones; para este propósito, se utilizaron varios indicadores de error como el RMS (*Root Mean Square Error* o error medio cuadrático), el MAE (Mean Absolute Error o Error medio Absoluto) y el RMAE (*Relative Mean Absolute Error* o Error medio absoluto relativo), presentados a continuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((Valor\ calculado)_i - (Valormedido)_i)^2}{N - 1}}$$
(5.1)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N ((Valor\ calculado)_i - (Valormedido)_i)}{N}$$
(5.2)

$$RMAE = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N ((Valor\ calculado)_i - (Valormedido)_i - \Delta medicion)}{N}}{(MediaValormedido)}$$
(5.3)

Estas diferencias son indicadores que miden cuanto distan las series de resultados de las series reales. El RMS es un indicador que funciona bien para valores cercanos a la media y se afecta fácilmente por picos anómalos en las series; por lo anterior, se utilizó también

el MAE y el RMAE, que no se afectan fácilmente con los valores anómalos, ya que cuantifican las diferencias promedio sin tener en cuenta la media de la serie de mediciones. Adicionalmente a lo anterior, el RMAE para las alturas significativas del oleaje en este trabajo fue corregido con el error de medición de las boyas direccionales o $\Delta_{medición} = 0,05 \text{ m}$ (VAN RIJN, L.C., 2007).

La información de los indicadores fue complementada con el cálculo de los coeficientes de determinación (R^2) y pruebas F y T entre los resultados y las mediciones, para comprobar si las medias o las varianzas eran distintas.

El RMS, el MAE y el RMAE no describen las diferencias direccionales, y se asumió que las direcciones del oleaje eran vectores unitarios, con lo cual se pudo hallar la diferencia entre el vector de una serie en un instante y el de la otra serie para el mismo momento en el tiempo.

Bajo la premisa anterior, se calcularon los vectores de dirección unitarios, los cuales fueron comparados utilizando el error vectorial relativo (REV Relative Error Vector) (WALSTRA, D. J. R. et al., 2003), calculados con la siguiente ecuación:

$$REV = \frac{\langle \sqrt{(X_{calculada} - X_{medida})^2 + (Y_{calculada} - Y_{medida})^2} \rangle}{\langle \sqrt{X_{medida}^2 + Y_{medida}^2} \rangle} \quad (5.4)$$

Donde:

$X_{calculada}$ es la componente unitaria occidente - oriente de la dirección del oleaje calculada.

X_{medida} : es la componente unitaria occidente - oriente de la dirección del oleaje medida.

$Y_{calculada}$ es la componente unitaria sur - norte de la dirección del oleaje calculada.

Y_{medida} : es la componente unitaria sur - norte de la dirección del oleaje medida.

A partir de las simulaciones con los menores indicadores de error, se determinó la configuración adecuada de los parámetros de entrada (ver Tabla 7.2) y con esta se procedió

a validar los resultados y calificar el desempeño del modelo al simular periodos de tiempo distintos a los de la calibración, con el fin de verificar la funcionalidad del modelo bajo condiciones climatológicas diferentes.

Para validar las modelaciones del oleaje fueron simulados los periodos desde el 01 de octubre al 31 de diciembre del 2009 y desde el 15 de febrero al 15 de marzo de 2011, y el primer periodo fue comparado con la información de la boya de Puerto Bolívar y del sistema de medición de oleaje satelital Jason-2, y el segundo periodo solo fue comparado con los datos del Jason-2.

Y se simularon los periodos del mes de septiembre de 1994 y el periodo desde el 15 de febrero al 15 de marzo de 2011, para poder calificar el desempeño del modelo en la simulación de mareas, comparándolos con los mareógrafos con información para este momento.

El modelo calibrado del mar Caribe fue evaluado cuantificando los errores del oleaje y las mareas en varios puntos de control (ver numeral 7), para lo cual, el RMAE fue el parámetro de evaluación con el que se ingresaba a la siguiente tabla de calificación:

Tabla 5.1 Estándares para la calificación del modelo utilizando el RMAE y REV.

Calificación	RMAE		REV
	Hs	Nivel	Dirección
Excelente	<5%	<20%	<20%
Buena	5%-10%	20%-40%	20%-40%
Aceptable	10%-20%	40%-70%	40%-70%
Pobre	20%-30	70%-100%	70%-100%
Mala	>30%	100%	100%

Modificado de (VAN RIJN, L. C., WALSTRAA, D. J. R., GRASMEIJERB, B., SUTHERLANDC, J., PAND, S., SIERRAE, J. P., 2003); (WALSTRA, D. J. R. et al., 2003) y (SOUSA, M. C., DIAS, J. M., 2007).

Los periodos al pico fueron calificados solo con el RMAE donde se consideró adecuado si los Tp no superaban un RMAE del 50%. Este criterio se determinó a partir de los resultados de los experimentos de VAN RIJN, L. C. (2007), donde se encontraron diferencias hasta del 50% entre distintos sistemas de medición (boyas direccionales y acelerómetros) en un

mismo punto del mar del norte, por lo que se asumió esta variabilidad de las mediciones como el RMAE máximo admisible para el Tp.

Los patrones de corrientes son importantes en la simulación de la hidrodinámica del Caribe, por lo que, al ver los buenos resultados del modelo en dos dimensiones ya validado, se decidió tridimensionalizar el modelo, con el fin de tener una mejor comprensión de la interacción entre el oleaje y las corrientes superficiales. Con este modelo en tres dimensiones se llevaron a cabo simulaciones de los meses de agosto y septiembre de 1994 y la época seca y húmeda de 2009, controlando que no se distorsionara el RMAE a tal punto que el modelo no fuera funcional. Al modelo tridimensional también se le adicionaron condiciones de borde del oleaje variables a lo largo de las fronteras norte y oriente (ver Figura 4.1), donde éstas series de oleaje fueron construidas utilizando la información suministrada por las boyas del National Data Buoy Center (NDBC) y del modelo Wave Watch III (WWIII).

Los resultados de estas últimas simulaciones fueron verificados y calificados utilizando el RMAE en las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar, para saber si el modelo seguía siendo confiable después de los cambios. Y fue verificada de forma cualitativa la coherencia de los patrones de corrientes superficiales, comprobando que las magnitudes de las velocidades y trayectorias de las corrientes fueran similares a las que otros autores han presentado en la literatura.

Por último, se llevaron a cabo algunos experimentos extra que permitieron establecer la aplicabilidad del modelo y su capacidad de caracterizar las mareas y el oleaje bajo diferentes situaciones climáticas o cambios en las fuentes de información, como cambios en la malla de viento, el paso de algunos huracanes y frentes fríos.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el análisis de sensibilidad, se evaluaron las variaciones en los resultados producidas por cambios en los parámetros de entrada con respecto a un modelo patrón, estableciendo así cual es la información de entrada relevante en la simulación del oleaje y las mareas en el Caribe, y cual debía ser analizada y ajustada en la fase de calibración.

Para lo anterior fueron realizadas las mismas pruebas tanto para el oleaje como para las mareas, y en este trabajo solo se presentan aquellas pruebas en las que se encontraron diferencias entre las simulaciones.

En este proceso se establecieron puntos de evaluación del oleaje y las mareas elegidos por su cercanía a puntos de medición conocidos, y se utilizaron parámetros que, aunque eran posibles candidatos de entrar en este análisis, estos fueron fijados por condiciones externas como la resolución de los datos de las fuentes de información.

Uno de estos parámetros fue el tamaño de las celdas de la malla de cálculo, donde se decidió que las celdas más pequeñas cerca a las costas tuvieran la misma resolución batimétrica del GEBCO, la cual está entre 30 arc segundos y 1 arc minuto según la zona, lo cual es equivalente a distancias entre 1 y 2 kilómetros, precisión que se consideró adecuada para representar las zonas costeras e insulares. Para las zonas de mar abierto sin cambios evidentes en las profundidades, se plantearon celdas de hasta 7 km.

En el caso de las constituyentes de marea se utilizaron las 13 constituyentes de marea que ofrece el software TMD, y se dividió la frontera de forma tal que entre los tramos se dieran cambios graduales en las amplitudes y fases de las constituyentes (ver Figura 4.2).

Tampoco fueron evaluadas diferentes fuentes de información batimétricas o de vientos, ya que para la escala del modelo la información era la más completa con la que se contaba; sin embargo, se espera que en futuras etapas del modelo se podrá conseguir información más precisa que permita mejorar los resultados.

Con algunos parámetros ya claros, se procedió a establecer dos parámetros numéricos importantes que son el intervalo temporal con el cual se calcula la ecuación de densidad

del oleaje y el intervalo temporal del cálculo de las ecuaciones de momentum y continuidad para el cálculo hidrodinámico.

Con el fin de conocer los intervalos temporales de cálculo se realizaron varias simulaciones con variaciones de estos valores. Estas fueron simulaciones cortas del periodo entre el 15 de diciembre de 2008 hasta el 16 de enero de 2009, para determinar el intervalo temporal del cálculo del oleaje (Δt_{oleaje}) y, para determinar el intervalo temporal en los cálculos hidrodinámicos ($\Delta t_{\text{hidrod.}}$), fue modelado el mes de agosto de 1994.

Los cambios en los intervalos de cálculo temporales tienen una influencia importante en el costo computacional y van intrínsecamente relacionados con la precisión, por lo que se realizaron variaciones a cada uno de estos intervalos encontrando los siguientes resultados:

6.1 EL COSTO COMPUTACIONAL DEBIDO A LA VARIACIÓN DEL INTERVALO DE CÁLCULO DEL OLEAJE (Δt_{OLEAJE})

El costo computacional fue medido con la relación entre el tiempo que se demoraba la simulación (T. simulación) y el tiempo real (T. real); los resultados encontrados al variar el intervalo de cálculo del oleaje son los que se presentan en la siguiente figura:

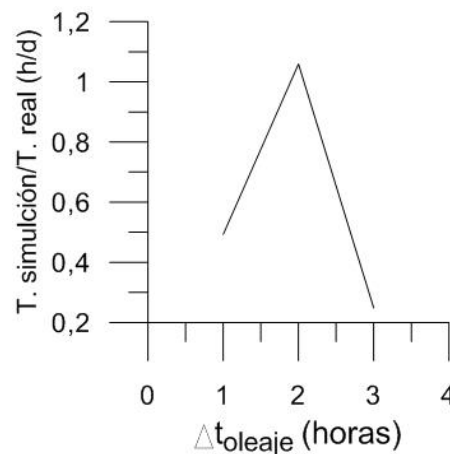


Figura 6.1 Costo computacional vs. Intervalo de cálculo del oleaje (Δt_{oleaje} .)

De la figura anterior se observa que el Δt_{oleaje} de 2 horas generó un costo computacional alto debido a que el SWAM realizó un número mayor de iteraciones para converger. Y el Δt_{oleaje} de 1 hora presentó un costo computacional de casi el doble por día real simulado.

En conclusión, el Δt_{oleaje} igual a 3 horas es el indicado porque tiene el menor costo computacional y las menores diferencias con respecto a la simulación con un Δt_{oleaje} igual a 1 hora en la mayor parte del dominio, ya que el 75% de los resultados de los dos modelos no tienen diferencias mayores al 20% para las alturas significativas y tienen diferencias aun menores en los cálculos de los periodos al pico.

6.2 EL COSTO COMPUTACIONAL DEBIDO A LA VARIACIÓN DEL INTERVALO DE CÁLCULO HIDRODINÁMICO ($\Delta T_{HIDROD.}$)

Los cambios en el intervalo de cálculo hidrodinámico afectan la precisión de las simulaciones de las mareas y de los patrones de circulación, y el tiempo de simulación y de convergencia del algoritmo del Flow Delft 3D.

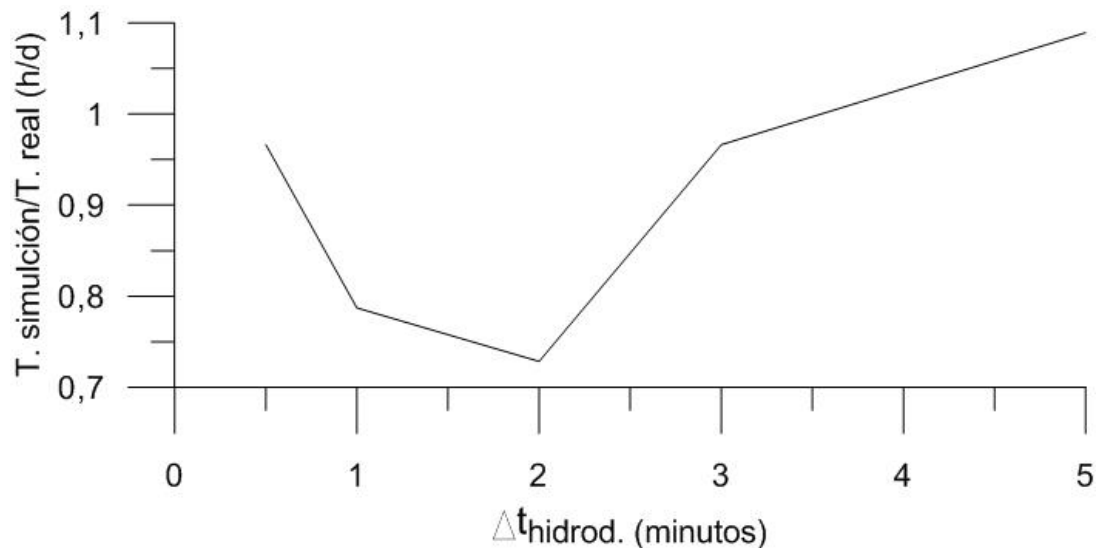


Figura 6.2 Costo computacional Vs. El intervalo de cálculo hidrodinámico ($\Delta t_{hidrod.}$)

El menor costo computacional fue obtenido con el Δt_{hidrod} de 2 minutos (figura 6.2), pero se consideró óptimo el Δt_{hidrod} de 3 minutos, ya que los resultados de los niveles de marea en el modelo no presentaban cambios importantes entre los intervalos de 3 y 5 minutos, lo que no pasaba entre los intercambios de 0,5 y 2 minutos.

6.3 EL COEFICIENTE DE DRAGADO Y SU INFLUENCIA EN EL OLEAJE

El mayor forzador del oleaje en el mar Caribe es el viento que genera esfuerzos cortantes sobre la superficie del agua, estos varían con los cambios de las velocidades del viento y de la rugosidad de la superficie del agua.

El coeficiente de dragado (C_d) ha sido calibrado por múltiples autores para diferentes zonas del planeta, que han encontrado funciones empíricas con las cuales se ha representado la rugosidad de la superficie del mar, las cuales dan una idea sobre el orden de magnitud que deben tener los C_d .

Dada la dificultad de conocer estos valores, se decidió evaluar la influencia de estos parámetros en los resultados de las alturas significativas (H_s) y períodos al pico (T_p) del oleaje.

Con este fin, se realizaron simulaciones en el período entre el 15 de diciembre de 2008 hasta el 16 de enero de 2009. Y se utilizaron como valores patrón los coeficientes de dragado que tiene el Delft 3D por defecto en el modelo patrón (ver Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Coeficientes de dragado del modelo patrón.

Fuente de los datos empíricos	Valores del Delft 3D	
Velocidad del viento (m/s)	10	100
C_d	0,00063	0,00723

A partir de los valores de partida (Tabla 6.1), se realizaron 10 pequeños cambios a los coeficientes que por defecto trae el Delft 3D para las velocidades del viento de 10 m/s y 100 m/s (Tabla 6.2). Entre las alternativas fueron utilizados los coeficientes hallados con la ecuación

(6.1) de E. E. Vera en 1983 (documento no publicado) (LARGE, W. G. et al., 1994).

$$C_d = 0,001 \left(\frac{2,7}{|U_{10}|} + 0,142 + 0,0764 |U_{10}| \right) \quad (6.1)$$

Tabla 6.2 Alternativas evaluadas de los coeficientes de dragado.

Alternativa	Cd	
	10 m/s	100 m/s
1	0,00063	0,00723
2	0,0005355	0,0061455
3	0,00063	0,0054225
4	0,001176	0,0054225
5	0,001176	0,001468
6	0,001176	0,007809
7	0,001752	0,00723
8	0,002352	0,00723
9	0,003	0,00723

Las 9 alternativas del Cd simuladas fueron comparadas entre sí, comparando cada una con respecto a las otras 8, y realizando 72 pruebas estadísticas T y 72 pruebas estadísticas F pareadas para verificar si las medias y las varianzas de las series de Hs, Tp y dirección del oleaje coincidían entre sí, para los trece puntos de control.

Con el anterior procedimiento se encontró que, en la costa caribe colombiana (Figura 6.3) y (Tabla 6.2), las simulaciones 5, 6 y 7 no difieren ni en la media, ni la varianza entre ellas para ninguna de las variables del oleaje.

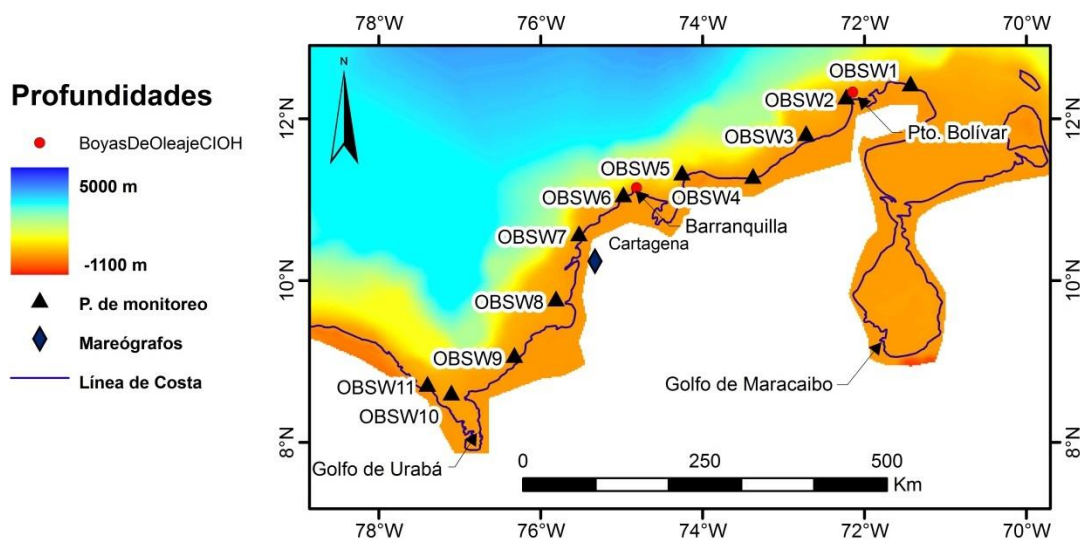


Figura 6.3 Puntos de monitoreo del modelo en el litoral Caribe colombiano.

Y si existían diferencias estadísticas entre los resultados de las demás simulaciones (1, 2, 3, 4, 8 y 9), con lo cual, se comprueba que las simulaciones de oleaje son afectadas debido a los cambios en la función del coeficiente de dragado.

También fueron evaluados los efectos en los niveles de marea que generaban las diferentes funciones del coeficiente de dragado, sin encontrar diferencias estadísticamente significativas; por lo tanto, los niveles de marea de las simulaciones se consideran insensibles a los cambios en los coeficientes de dragado.

6.4 LA RUGOSIDAD DEL FONDO Y SU INFLUENCIA EN LOS NIVELES DE MAREA

La rugosidad del fondo genera cambios en los esfuerzos del fluido en el contacto entre el agua y el fondo del mar. Este parámetro es difícil de establecer para un área grande como el Caribe, y se dificulta aún más a sabiendas de que los coeficientes de rugosidad varían con el material del fondo y la profundidad del mar.

Los esfuerzos cortantes debidos al contacto del agua con el fondo marino se oponen a la dirección de los flujos y entran dentro del cálculo de las ecuaciones de conservación del momentum, y por lo tanto influyen las velocidades de las corrientes y por ende los niveles de las mareas.

Las olas al interactuar con el fondo disipan energía, y esta disipación varía con los diferentes obstáculos, con la interacción con otras olas y las corrientes, con la percolación y con la rugosidad del fondo. Todos estos aspectos son tenidos en cuenta por el SWAN, utilizando espectros de disipación del oleaje, los cuales no utilizan el coeficiente de rugosidad de Manning, por lo que se decidió no analizar el impacto de esta variable en el oleaje.

Con el fin de conocer los efectos de la rugosidad del fondo en las mareas meteorológicas y las corrientes, se corrieron simulaciones con pequeños cambios en los valores del n de Manning.

Se eligieron 16 puntos ubicados a lo largo y ancho del dominio del modelo y otros más en los sitios donde han existido mareógrafos en el Caribe (ver Figura 6.4), donde en todos se evaluó si las diferentes rugosidades modificaban los resultados.

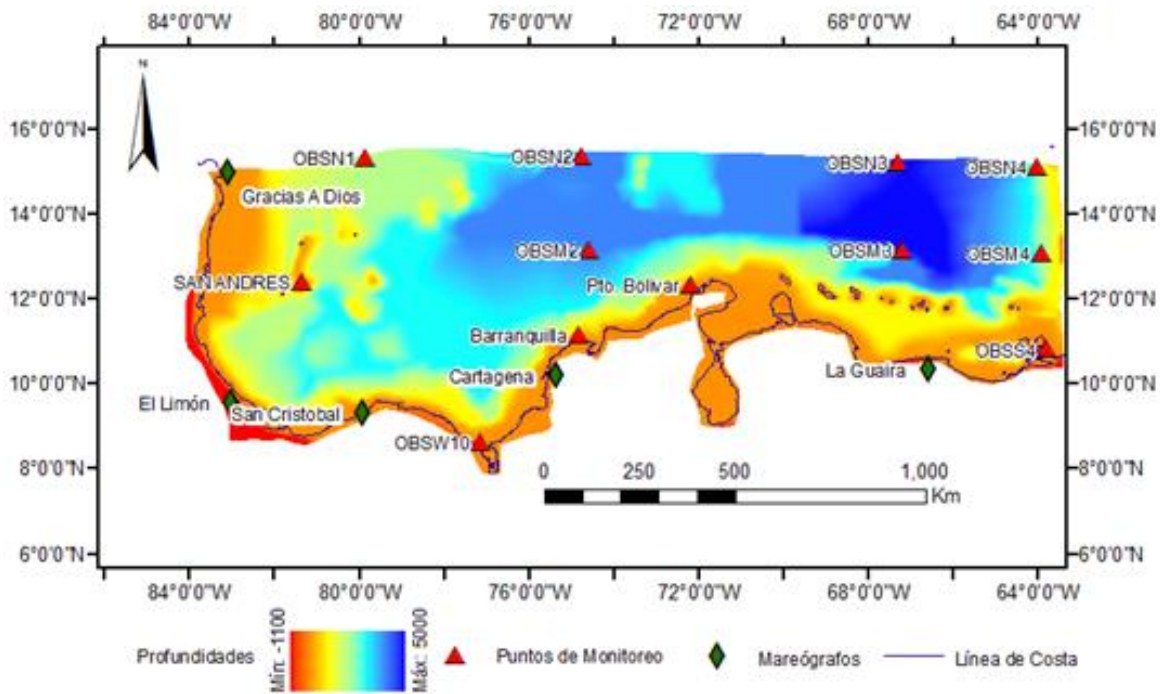


Figura 6.4 Puntos de monitoreo de las mareas para el análisis de sensibilidad.

Las series de mareas para cada una de las simulaciones fueron comparadas con las series de la simulación patrón, utilizando la Diferencia Absoluta Promediada en el Tiempo Relativa (DAPTR), el cual es un RMAE donde no se comparan los datos con respecto a una medición sino a un modelo base, y permite cuantificar cuál de las series es más distante de la otra. Este proceso se complementó con pruebas T y F, con el fin de saber si las medias y las varianzas de las series eran diferentes.

Se evaluaron siete alternativas de la rugosidad del fondo, algunas variando los coeficientes según las profundidades de las celdas de la malla de cálculo y otras donde estos valores eran constantes en todo el dominio; en la Tabla 6.3 se presentan las diferentes alternativas consideradas:

Tabla 6.3 Valores del n de Manning evaluados en el análisis de sensibilidad.

Alternativas	Coeficientes de Manning
1	$n = 0,03$ si $Profundidad \geq 100\text{ m}$ $n = 0,025$ si $100\text{ m} > Profundidad \geq -1\text{ m}$ $n = 0,1$ si $-1\text{ m} < Profundidad$
2	$n=0,2$
3	$n=0,1$
4	$n=0,05$
5 ¹	$n = 0,021$ si $Profundidad \leq 65\text{ m}$ $n = \frac{\sqrt[6]{0,021}}{(65 + (Profundidad - 40))}$ si $65 < Profundidad \leq 40\text{ m}$ $n = 0,028$ si $Profundidad > 40\text{ m}$
6	$n=0,02$
7	$n=0,01$

Con estas alternativas se encontró que el nivel medio de las series de mareas no varía de forma significativa, para la escala del modelo, debido a los cambios en la rugosidad.

Los resultados de las pruebas T y F pareadas, realizadas entre las series de los puntos de control, dan como resultado que las medias y las varianzas de las series son iguales para un 95% de confiabilidad. Por lo anterior, la diferencia real entre las series son pequeños cambios en los niveles.

El efecto de la rugosidad del fondo en las velocidades de las corrientes y los niveles de las mareas está relacionado con las profundidades del mar; en mar abierto, donde las profundidades son grandes, este efecto es muy bajo (Tabla 6.4), por lo que se considera que los niveles no son sensibles a este parámetro en estos sitios.

¹ Las ecuaciones utilizadas para la construcción de la alternativa 5, provienen de la ecuación modificada de GERRITSEN, Herman (1995).

Sin embargo, para las zonas costeras poco profundas entre los 0 y los 150 m los niveles de la marea si son sensibles a la rugosidad del fondo, donde se encuentran DAPTR hasta de 1,51%.

Tabla 6.4 Diferencias máximas en las mareas debidas a los cambios en el n de Manning.

Puntos de Control	Efecto en los niveles del mar	
	DAPTR	Profundidad
Cabo Gracias a Dios	0.27%	35,75
Limón	1.51%	20,20
San Cristóbal	1.28%	17,00
OBSW10	0.16%	67,95
Cartagena	0.76%	12,10
Barranquilla	0.39%	150,00
Puerto Bolívar	0.21%	130,00
La Guaira	0.37%	55,00
San Andrés	1.00%	168,00
OBSM2	0.21%	39,95
OBSM3	0.07%	4858,00
OBSM4	0.16%	2373,00
OBSN1	0.04%	1955,00
OBSN2	0.01%	3981,00
OBSN3	0.02%	4754,00
OBSN4	0.06%	1534,00

Los resultados anteriores evidencian las diferencias generadas por los n de Manning y, ya que estos coeficientes son difíciles de definir para todo el dominio del modelo, estos valores deberán ser calibrados.

6.5 EFECTOS DE LA VISCOSIDAD DE REMOLINO EN LOS NIVELES DEL MAR Y LOS PATRONES DE CIRCULACIÓN

La viscosidad de remolino horizontal (Horizontal Eddy Viscosity) está relacionada con la turbulencia generada por los movimientos horizontales del agua y, desde un punto de vista numérico, depende del tamaño de las celdas de la malla de cálculo. Un estimativo del valor

inicial de la Viscosidad de Remolino para las mallas que cubren grandes áreas, es que pueden tener valores de cientos de m^2/s (WL|DELFT HYDRAULICS, octubre 2007).

Debido al amplio rango de selección de esta variable, se debe determinar la sensibilidad de las simulaciones a este parámetro. Estas comparaciones se hicieron en los mismos puntos de control utilizados en el análisis de sensibilidad de la rugosidad del fondo (Figura 6.4) y con la misma metodología. En la tabla a continuación se presentan las alternativas analizadas:

Tabla 6.5 Alternativas de la Viscosidad de Remolino evaluadas en el análisis de sensibilidad.

Alternativas	Viscosidad de Remolino
1	0,002
2	10
3	100
4	500
5	1000

El primer resultado del análisis de sensibilidad fue que las pruebas T y F pareadas, realizadas entre las series de los puntos de control, dan como resultado que las medias y las varianzas de las series son iguales para un 95% de confiabilidad. Por lo anterior, la diferencia real entre las series son pequeños cambios en los niveles.

Los cambios en los niveles de la marea con respecto a las variaciones de la Viscosidad de Remolino no superan el 1,51%, y tienen una variación espacial donde los DAPTR son mayores en las zonas costeras. En la tabla a continuación, se muestran los máximos DAPTR para todos los puntos de control:

Tabla 6.6 DAPTR Máximos debidos a los cambios en la Viscosidad de Remolino.

Puntos de Control	Efecto en los niveles del mar	Profundidad
Cabo Gracias a Dios	0.28%	35,75
Limón	1.51%	20,20
San Cristóbal	1.28%	17,00
OBSW10	0.19%	67,95
Cartagena	0.72%	12,10
Barranquilla	0.39%	150,00
Puerto Bolívar	0.20%	130,00
La Guaira	0.36%	55,00
San Andrés	1.00%	168,00
OBSM2	0.21%	39,95
OBSM3	0.08%	4858,00
OBSM4	0.19%	2373,00
OBSN1	0.05%	1955,00
OBSN2	0.03%	3981,00
OBSN3	0.04%	4754,00
OBSN4	0.06%	1534,00

Las viscosidades de remolino generan cambios en los niveles de las mareas como es evidente en la tabla anterior. Si se comparan estas diferencias con los rangos mareales que hasta ahora se han encontrado en este trabajo, cercanos a los 0,40 m, se podría decir que esta variación no parece muy grande pero, teniendo en cuenta que este es un parámetro difícil de medir en toda el área de estudio, este valor se elige para ser definido en la etapa de calibración.

En resumen, en el análisis de sensibilidad se eligieron los intervalos temporales para el cálculo de los oleajes, las mareas y las corrientes que generaban mínimas diferencias con respecto a la modelación patrón, o sea donde las simulaciones convergían con costos computacionales similares y tenían costos computacionales bajos.

El análisis de sensibilidad permitió también conocer como los parámetros de entrada afectaban los resultados y el funcionamiento del modelo y que los coeficientes de dragado,

las rugosidades del fondo y las viscosidades de remolino se deben calibrar para tratar de refinar los resultados del modelo con respecto a las mediciones en la región.

Es de aclarar que las evaluaciones de los cálculos del oleaje se llevaron a cabo en la época seca del 2009, época donde se presentan fuertes vientos; este fenómeno, aunque es posible que maximice las diferencias entre los modelos, no se espera que pueda llegar a cambiar las decisiones tomadas si la evaluación se hubiera realizado en la época húmeda.

7. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La calibración de un modelo matemático es un proceso que tiene el fin de ajustar la configuración de los parámetros de entrada, para que los resultados de las simulaciones tengan la menor diferencia con respecto a los datos medidos.

Por lo anterior, los resultados de las simulaciones del análisis de sensibilidad fueron comparados con las mediciones de altura significativa, periodo al pico y dirección del oleaje en las boyas del CIOH en Barranquilla y Puerto Bolívar entre el 17 de diciembre de 2008 y el 15 de enero de 2009. Este mismo procedimiento fue aplicado a los niveles de marea del mes de septiembre de 1994, confrontando los resultados del modelo con las mediciones de los mareógrafos de Cartagena, La Guaira y San Cristóbal.

Al analizar los resultados del proceso de calibración, se eligieron los parámetros de entrada que fueran físicamente coherentes y que generaran los menores errores (RMAE, MAE, RMS y REV) con respecto a las mediciones; los resultados de este procedimiento se presentan a continuación.

7.1 CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE DRAGADO

El coeficiente de dragado (C_d) es similar a un coeficiente de fricción, el cual varía en función de la velocidad del viento, la presión atmosférica, la temperatura del aire y del agua; lo que hace difícil la medición directa de este coeficiente y por ende su determinación.

La calibración del coeficiente de dragado se realizó comparando los resultados de las diferentes simulaciones del análisis de sensibilidad donde se modificaba esta variable, (Tabla 6.2) con respecto a las medidas de las boyas direccionales de Barranquilla y Puerto Bolívar.

Las comparaciones se hicieron utilizando las pruebas T y F, el RMS, el MAE, el RMAE y R^2 , y el REV. Se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 7.1 Comparaciones entre las Hs simuladas con respecto a las mediciones de la boya de Barranquilla debidas a los cambios en los Cd.

Cd		RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T	R ²
10 m/s	100 m/s						
0,00063	0,00723	0,554	0,467	15,76%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3774
0,0005355	0,0061455	0,497	0,415	13,56%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3752
0,00063	0,0054225	0,497	0,416	13,57%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3747
0,001176	0,0054225	0,498	0,416	13,60%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3763
0,001176	0,001468	0,498	0,416	13,59%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3752
0,001176	0,007809	0,495	0,414	13,52%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3796
0,001752	0,00723	0,497	0,414	13,55%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3785
0,002352	0,00723	0,497	0,413	13,53%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3789
0,003	0,00723	0,498	0,412	13,52%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,3729

Tabla 7.2 Comparaciones entre las Hs simuladas con respecto a las mediciones de la boya de Puerto Bolívar debidas a los cambios en los Cd.

Cd		RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T	R ²
10 m/s	100 m/s						
0,00063	0,00723	0,588	0,484	23,33%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2178
0,0005355	0,0061455	0,354	0,271	10,86%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4700
0,00063	0,0054225	0,354	0,271	10,88%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4698
0,001176	0,0054225	0,352	0,270	10,79%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4754
0,001176	0,001468	0,354	0,271	10,85%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4724
0,001176	0,007809	0,352	0,270	10,83%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4760
0,001752	0,00723	0,351	0,271	10,86%	Varianzas iguales	Las medias son iguales	0,4774
0,002352	0,00723	0,353	0,273	10,99%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,4771
0,003	0,00723	0,355	0,275	11,11%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,4763

Tabla 7.3 Comparaciones entre los Tp simulados con respecto a las mediciones de la boya de Barranquilla debidas a los cambios en los Cd.

Cd		RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T	R ²
10 m/s	100 m/s						
0,00063	0,00723	2,134	1,940	26,20%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,1590
0,0005355	0,0061455	1,899	1,706	23,04%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2180
0,00063	0,0054225	1,900	1,707	23,05%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2174
0,001176	0,0054225	1,902	1,709	23,08%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2166
0,001176	0,001468	1,899	1,705	23,02%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2171
0,001176	0,007809	1,894	1,701	22,98%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2173
0,001752	0,00723	1,886	1,692	22,85%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2228
0,002352	0,00723	1,903	1,711	23,11%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2198
0,003	0,00723	1,929	1,740	23,49%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2143

Tabla 7.4 Comparaciones entre los Tp simulados con respecto a las mediciones de la boya de Puerto Bolívar debidas a los cambios en los Cd.

Cd		RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T	R ²
10 m/s	100 m/s						
0,00063	0,00723	3,891	3,586	46,29%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,0991
0,0005355	0,0061455	3,099	2,803	36,18%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2863
0,00063	0,0054225	3,101	2,805	36,20%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2845
0,001176	0,0054225	3,129	2,836	36,61%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2869
0,001176	0,001468	3,109	2,814	36,32%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2862
0,001176	0,007809	3,141	2,850	36,78%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2856
0,001752	0,00723	3,170	2,879	37,16%	Varianzas iguales	Las medias difieren	0,2813
0,002352	0,00723	3,201	2,915	37,63%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2842
0,003	0,00723	3,217	2,934	37,87%	Varianzas distintas	Las medias difieren	0,2877

Tabla 7.5 Error Vectorial Relativo (REV) en las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar debidos a los cambios en los coeficientes de dragado del viento.

Alternativa	REV BARRANQUILLA	REV PTO, BOLÍVAR
1	13,64%	13,98%
2	13,37%	14,26%
3	13,35%	14,28%
4	13,43%	14,20%
5	13,31%	14,18%
6	13,35%	14,27%
7	13,50%	14,42%
8	13,57%	14,58%
9	13,65%	14,70%

Al revisar los diferentes indicadores de error para alturas significativas (H_s), periodos al pico (T_p) y dirección del oleaje se puede decir que las alternativas 5, 6 y 7 presentan los menores RMAE y los menores errores vectoriales.

Y se concluye que la alternativa 6 donde los coeficientes fueron calculados con la ecuación (6.1) planteada por LARGE, W. G. et al. (1994), tiene los menores errores en la estimación de las alturas significativas y presenta muy bajas diferencias en los periodos al pico y en las direcciones.

En este punto del proceso de calibración, aún las series de oleaje difieren tanto en la media como en la varianza, y esto incide en la capacidad del modelo de representar estas variables, o sea en el valor del R^2 . Esto se debe a que aún no se tiene definida la configuración final del modelo. La definición final de la alternativa elegida se hará en conjunto con las pruebas de las dos bases de datos de vientos.

7.2 CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE LA RUGOSIDAD DEL FONDO

Los resultados hallados con las diferentes alternativas de los coeficientes de Manning en las simulaciones del mes de septiembre de 1994 en el análisis de sensibilidad, fueron comparados con respecto a las mediciones de los mareógrafos de: la Guaira en Venezuela, Cartagena en Colombia y San Cristóbal en Panamá, utilizando el RMS, el MAE y el coeficiente de determinación (R^2). Se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 7.6 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en Cartagena debidos a los cambios en los coeficientes de rugosidad del fondo.

n de Manning	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R^2
n de Manning (0,03-0,3)	0,0399	0,03162	14,01%	0,7905
n de Manning (0,2)	0,0384	0,03056	13,55%	0,8070
n de Manning (0,1)	0,0390	0,03087	13,68%	0,8007
n de Manning (0,05)	0,0396	0,03134	13,89%	0,7940
n de Manning (0,021-0,028)	0,0400	0,03180	14,10%	0,7891
n de Manning (n=0,02)	0,0399	0,03173	14,07%	0,7904
n de Manning (n=0,01)	0,0399	0,03172	14,06%	0,7903

Tabla 7.7 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en La Guaira debidos a los cambios en los coeficientes de rugosidad del fondo.

n de Manning	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R^2
n de Manning (0,03-0,3)	0,0443	0,0359	2,80%	0,7690
n de Manning (0,2)	0,0437	0,0355	2,77%	0,7786
n de Manning (0,1)	0,0440	0,0357	2,79%	0,7732
n de Manning (0,05)	0,0442	0,0358	2,80%	0,7704
n de Manning (0,021-0,028)	0,0445	0,0360	2,81%	0,7681
n de Manning (n=0,02)	0,0445	0,0360	2,81%	0,7673
n de Manning (n=0,01)	0,0442	0,0358	2,80%	0,7690

Tabla 7.8 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en San Cristóbal debidos a los cambios de rugosidad del fondo.

n de Manning	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
n de Manning (0,03-0,3)	0,0703	0,05759	7,30%	0,4593
n de Manning (0,2)	0,0659	0,05398	6,84%	0,5065
n de Manning (0,1)	0,0679	0,05566	7,05%	0,4837
n de Manning (0,05)	0,0698	0,05715	7,24%	0,4645
n de Manning (0,021-0,028)	0,0706	0,05778	7,32%	0,4572
n de Manning (n=0,02)	0,0708	0,05798	7,35%	0,4585
n de Manning (0,01)	0,0703	0,05769	7,31%	0,4597

En los resultados es evidente la influencia de la rugosidad del fondo en los cambios en los niveles del mar. Aunque el menor RMAE se presenta con el n de Manning igual a 0,2, este valor es físicamente inadecuado, debido a que estas rugosidades solo se presentan en zonas boscosas con presencia de grandes obstáculos para el flujo, lo que no es el caso de este modelo.

De los RMAE, se concluye que la simulación con los coeficientes de Manning en zonas profundas igual a 0,021 y en zonas someras de 0,028, iguales a las utilizadas en el proceso de calibración del *Dutch Continental Shelf Model* (GERRITSEN, HERMAN et al., 1995) es la mejor opción.

Ya que estos coeficientes de Manning son físicamente adecuados, porque están definidos varios dentro del siguiente rango de valores: 0,05 para flujos poco obstruidos y bastante rugosos, y 0,02 para fondos arenosos sin obstrucciones (ALDRIDGE, B. N y GARRET, J. M., 1973, COWAN, W. L. , 1956), lo cual es el caso de este modelo.

7.3 CALIBRACIÓN DEL VALOR DE LA VISCOSIDAD DE REMOLINO

A partir de los resultados de las simulaciones del mes de septiembre de 1994 del análisis de sensibilidad, donde se analizaron diferentes valores de viscosidad de remolino, se cuantificaron las diferencias entre el modelo y los diferentes mareógrafos. Se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 7.9 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en Cartagena por los cambios en la viscosidad de remolino.

Viscosidad de remolino (m ² /s)	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
1000	0,03833	0,03046	13,51%	0,80817
500	0,03839	0,03051	13,53%	0,80756
100	0,03844	0,03056	13,55%	0,80707
10	0,03843	0,03055	13,55%	0,80721
0,0002	0,03973	0,03151	13,97%	0,79222

Tabla 7.10 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas en La Guaira debidos a los cambios en la viscosidad de remolino.

Viscosidad de remolino (m ² /s)	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
1000	0,04666	0,03603	2,82%	0,77784
500	0,04666	0,03603	2,81%	0,77805
100	0,04667	0,03604	2,82%	0,77812
10	0,04665	0,03601	2,81%	0,77777
0,0002	0,04718	0,03645	2,85%	0,76844

Tabla 7.11 Errores en los niveles de las mareas meteorológicas simuladas en San Cristóbal debidos a los cambios en la viscosidad de remolino.

Viscosidad de remolino (m ² /s)	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
1000	0,12791	0,10522	13,34%	0,50507
500	0,06607	0,05409	6,86%	0,50500
100	0,06604	0,05407	6,85%	0,50515
10	0,06659	0,05452	6,91%	0,49833
0,0002	0,07051	0,05774	7,32%	0,45809

En la Tabla 7.9, la Tabla 7.10 y la Tabla 7.11 el error cuadrático (RMS) y el error medio absoluto (MAE) son poco sensibles a los cambios en las Viscosidades de Remolino. Al

comparar los diferentes cuantificadores del error se observó que los RMAE más bajos para los mareógrafos de Cartagena, La Guaira y San Cristóbal son los generados con las viscosidades de remolino de 1000, 500 y 100 m^2/s respectivamente; también se da que el RMAE más alto para San Cristóbal es el encontrado con el valor 1000 m^2/s . En aras de definir un único valor para toda el área de estudio, se decidió utilizar el valor de 500 m^2/s , el cual no genera errores importantes en Cartagena y La Guaira y tampoco lo hace en San Cristóbal, como si lo hace el de 1000 m^2/s .

7.4 CALIBRACIÓN Y ELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS DEL VIENTO Y LAS PRESIONES ATMOSFÉRICAS

El viento es un insumo importante para el modelo del Caribe. En el proceso de calibración, se utilizó la base de datos del NARR con una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ y con datos cada 3 horas, que se consideró la más adecuada, porque que tiene una mejor resolución espacial y temporal.

Pero el NARR tiene un problema: puede tener hasta un año de retraso en la publicación de la información por lo que, con el fin de tener a disposición información de manera más expedita, se evaluó la base de datos del National Center for Atmospheric Research (UCAR/NCAR/CISL/DSS > DATA SUPPORT SECTION, SCIENTIFIC COMPUTING DIVISION, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH), la cual tiene un retraso en la publicación de la información de aproximadamente un mes, y una resolución espacial menor de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ y con datos cada 6 horas, lo que puede facilitar en futuro hacer simulaciones de eventos ocurridos recientemente.

Por ende, se decidió calcular la diferencia promedio en el tiempo entre las dos bases de datos, comparando las interpolaciones del viento realizadas por el módulo Flow del Delft 3D en las simulaciones del periodo entre el 15 de diciembre del 2008 y el 16 de enero del 2009 para las dos bases de datos.

Las diferencias entre las dos bases de datos se calcularon para cada una de las celdas del dominio del modelo del Caribe utilizando la siguiente ecuación:

$$DPT = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_{NARR} - X_{NCAR})$$

(7.1)

Donde:

N: Número de intervalos de tiempo.

X_{NARR} : Valor de la velocidad del viento de la base de datos de NARR.

X_{NCAR} : Valor de la velocidad del viento de la base de datos de NCAR.

La Diferencia Relativa Promediada en el tiempo se utilizó para comparar las magnitudes de las velocidades del viento obtenidas de las bases de datos del NARR y el NCAR, en el periodo entre el 15 de diciembre del 2008 y el 16 de enero del 2009.

En este proceso, se encontraron diferencias máximas de 7,70 m/s en las velocidades en el sentido de las latitudes y de -4,60 m/s en el sentido longitudinal; también se evidenció que las diferencias en las magnitudes de las velocidades del viento se minimizan en mar abierto, y se maximizan en las zonas cercanas a las costas, así como en las zonas cercanas a Barranquilla y Santa Marta, donde se presentan velocidades del viento más altas, como se ve en las siguientes figuras:

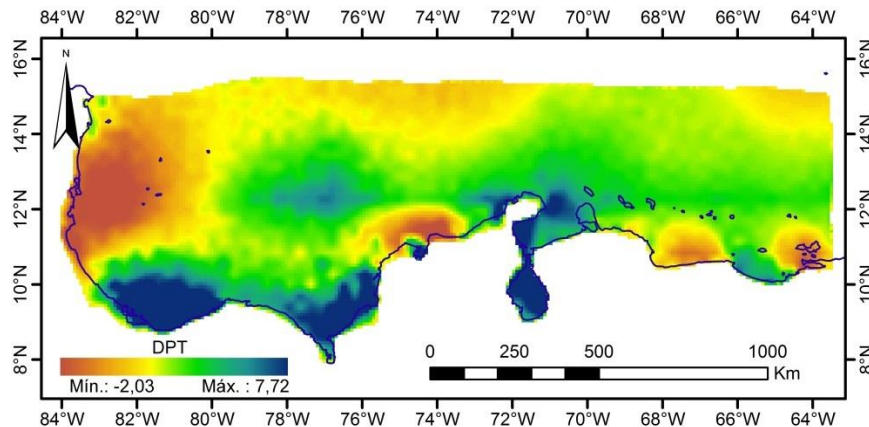


Figura 7.1 DPT de las velocidades del viento en el sentido occidente a oriente.

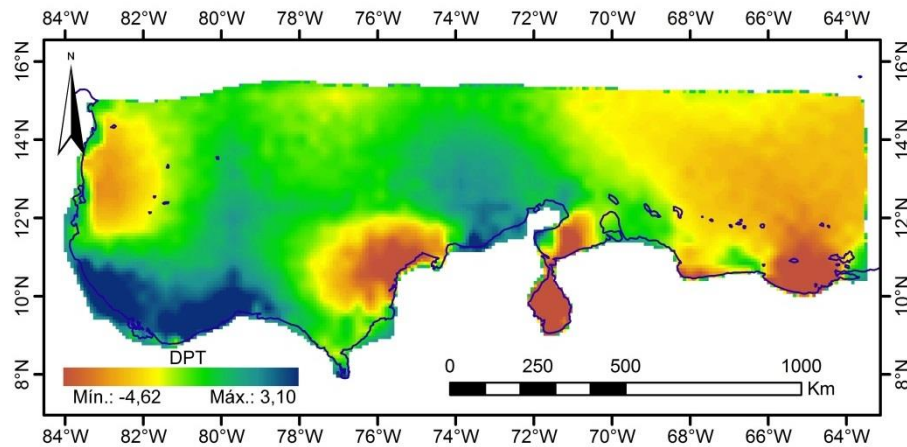


Figura 7.2 DPT de las velocidades del viento en el sentido sur a norte.

En el golfo de Urabá se observó una gran diferencia en las velocidades en el sentido occidente oriente, por las diferencias en las resoluciones espaciales entre las dos reanálisis, debido a que el NCAR en una sola celda está influenciado por el viento en el océano Pacífico y el viento de las montañas centroamericanas; este mismo efecto se observa cerca de la costa panameña.

También fueron halladas grandes DPT en el golfo de Maracaibo, ya que este cuerpo de agua es bastante pequeño con respecto al tamaño de las celdas del NCAR, por lo que el golfo de Maracaibo para esta base de datos tiene velocidades del viento iguales a las del continente.

Luego de comparar las magnitudes de las velocidades del viento, fueron analizados los resultados de las modelaciones con respecto a las series de las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar, y se encontró que las series de alturas significativas calculadas utilizando las dos bases de datos tienen medias que difieren con respecto a las series de las boyas direccionales.

En cuanto a los periodos al pico se observó una leve mejoría en los resultados para las dos boyas con las simulaciones del NCAR, como se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 7.12 Errores de las Hs con respecto a los datos de la boya en Barranquilla debidas a la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T
NARR	0,498	0,417	17,64%	Varianzas iguales	Las medias difieren
NCAR	0,492	0,380	16,05%	Varianzas iguales	Las medias difieren

Tabla 7.13 Errores de las Hs con respecto a los datos de la boya en Puerto Bolívar por la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	F	T
NARR	0,353	0,272	16,24%	Varianzas iguales	Las medias son iguales
NCAR	0,718	0,586	35,05%	Varianzas iguales	Las medias difieren

Tabla 7.14 Errores de los Tp con respecto a los datos de la boya en Barranquilla por la utilización del NARR o el NCAR.

Base de datos	RMS (s)	MAE (s)	RMAE	F	T
NARR	1,922	1,732	23,39%	Varianzas distintas	Las medias difieren
NCAR	1,836	1,640	22,14%	Varianzas distintas	Las medias difieren

Tabla 7.15 Errores de los Tp con respecto a los datos de la boya en Puerto Bolívar por la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (s)	MAE (s)	RMAE	F	T
NARR	3,125	2,838	36,64%	Varianzas distintas	Las medias difieren
NCAR	2,881	2,489	32,12%	Varianzas distintas	Las medias difieren

Las diferencias medias entre las series direccionales y las mediciones fueron evaluadas utilizando el REV y se encontró que el error entre las series no es muy alto, aunque el comportamiento medio direccional del modelo para los dos casos es bueno como se ve en el cálculo de los errores a continuación:

Tabla 7.16 Diferencias direccionales de las simulaciones debidas a la utilización del NARR y el NCAR con respecto a las boyas direccionales de oleaje.

Base de datos	REV	
	Barranquilla	Puerto Bolívar
NARR	13,57%	14,08%
NCAR	11,89%	13,54%

La utilización de una base de datos u otra no es indiferente pues se generan cambios en los resultados del modelo, sin embargo, la menor resolución temporal del NCAR podría impedir ver los cambios rápidos de la dirección del oleaje y la velocidad del viento (cambios puntuales menores a 6 horas), los cuales afectan las Alturas Significativas del Oleaje y los Periodos al Pico. Las diferencias entre las direcciones no son importantes, porque con las dos bases de datos se puede decir que las direcciones del oleaje son bien representadas por el modelo.

También se evaluaron las diferencias en los niveles de las mareas debidas al cambio de la base de datos de vientos y presiones atmosféricas, las cuales fueron obtenidas simulando el periodo entre el 9 de agosto y el 24 de septiembre de 1994. Estas diferencias se presentan a continuación:

Tabla 7.17 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de Cartagena debidas a la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
NARR	0,04029	0,03207	14,18%	0,78827
NCAR	0,03664	0,02939	13,00%	0,83458

Tabla 7.18 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de La Guaira debidas a la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
NARR	0,05223	0,04016	3,14%	0,67893
NCAR	0,05541	0,04277	3,34%	0,65492

Tabla 7.19 Diferencias en los niveles de las mareas en el mareógrafo de La Guaira debidas a la utilización del NARR y el NCAR.

Base de datos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	R ²
NARR	0,05223	0,04882	6,19%	0,52092
NCAR	0,05541	0,05620	7,12%	0,48902

No se encontraron diferencias significativas en los niveles de marea que descalificaran el uso de la base de datos del NCAR, como es notorio en las tablas anteriores.

En futuras investigaciones se podrán complementar estas bases de datos con mediciones del viento y de las presiones atmosféricas en diferentes lugares del mar Caribe, y con esta información se podría mejorar la información en las zonas donde las bases de datos no tengan buena precisión.

Se puede concluir que utilizar la base de datos NCAR, para la simulación de condiciones de vientos normales en mar abierto, es válido. En las zonas cercanas al continente, se puede mejorar la información utilizando mediciones realizadas en las costas. En pro de obtener los mejores resultados es preferible utilizar la base de datos del NARR, porque esta tiene una malla más fina y los intervalos temporales también son menores, por ende en este modelo se seguirá utilizando la malla del NARR, sin descartar la del NCAR para futuras pruebas.

7.5 PARÁMETROS CALIBRADOS DEL MODELO DEL MAR CARIBE

En el proceso de calibración del modelo del Caribe se eligieron aquellos parámetros de entrada que generaban una mejora en los resultados y disminuían los indicadores de error, y que funcionaban bien tanto para las simulaciones de oleaje como de las mareas. En la siguiente tabla se resumen los valores óptimos hallados en el análisis de calibración:

Tabla 7.20 Parámetros de entrada del modelo calibrado.

Parámetro	Valor	Unidad
Coeficiente de dragado del viento para 0 m/s	0,001176	
Coeficiente de dragado del viento para 100 m/s	0,007809	
Rugosidad n Manning en las dos direcciones	$n = \frac{\sqrt[6]{0,021}}{(65 + (Profundidad - 40))} \begin{matrix} n = 0,021 \text{ si } Profund. \leq 65 \text{ m} \\ \text{si } 65 < Profund.: \\ n = 0,028 \text{ si } Profund. > 40 \text{ m} \end{matrix}$	
Viscosidad de Remolino	500	m ² /s
Base de datos del viento	NARR	
Intervalo de tiempo del modelo hidrodinámico	3	min
Intervalo de tiempo del modelo de oleaje	3	horas

Los parámetros de entrada calibrados del modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe fueron utilizados en este trabajo en las simulaciones de algunos periodos complementarios durante el año 2009 y 1994, con el fin de calificar el desempeño y funcionalidad del modelo durante diferentes periodos climáticos.

7.6 VALIDACIÓN DEL OLAJE

El modelo del Caribe debe ser funcional para cualquier época del año. Con el propósito de conocer su desempeño durante todo un año, se simuló el año 2009 con los parámetros elegidos en la calibración, y los resultados se compararon con respecto a los datos de las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar durante el periodo del 17 de diciembre de 2018 al 31 de diciembre de 2009, y se compararon de forma gráfica con los resultados del modelo Wave Watch III. En la Tabla 7.21 se presentan los errores encontrados entre las modelaciones y las mediciones del oleaje:

Tabla 7.21 RMAE y REV encontrados con el modelo calibrado durante el 2009.

Periodos	Punto de control	MAE (RMAE%) REV	
		Variable	
17/12/2008 a 31/01/2009	Barranquilla	Hs	0,43 (15,26)
		Tp	1,92 (26,58)
		Dir	12,38 (26,12) 0,215
17/12/2008 a 15/01/2009	Puerto Bolívar	Hs	0,35 (15,87)
		Tp	3,22 (41,60)
		Dir	8,3 (15,28) 0,145
1/10/2009 a 31/12/2009	Puerto Bolívar	Hs	0,35 (22,60)
		Tp	2,74 (37,20)
		Dir	16,74 (28,70) 0,199

En la época de lluvias se tienen mediciones en la boya de Puerto Bolívar. El modelo para esta época se puede calificar como pobre si se habla a partir del RMAE debido a que no representó de la manera más adecuada los últimos días de diciembre de 2009 en esta zona (ver Figura 7.3). Es posible que esto se deba a que, durante esta época se dan cambios repentinos en la velocidad de los vientos en el Litoral Caribe Colombiano, los cuales no parecen haber sido representados por la malla de vientos.

Para complementar las pruebas anteriores, se compararon las varianzas de los datos de oleaje y las modelaciones con pruebas F pareadas, y dieron como resultado que las series de las simulaciones y las series de datos tienen varianzas estadísticamente iguales.

A través de pruebas T, se encontró que existen diferencias estadísticas entre las medias de las simulaciones de Hs y las medidas, que pueden estar relacionadas con cambios en los patrones locales del viento o son promediadas por la resolución de la información, los cuales no son tenidos en cuenta por las bases de datos de esta variable, debido al tamaño de sus celdas.

En la modelación del año 2009, se pudo observar que en los primeros meses en el Caribe norte el oleaje venia del noreste y daba un giro gradual en la península de la Guajira, hasta obtener una dirección norte cerca al golfo de Urabá. Durante este periodo, se encontraron vientos del chorro tropical superficial del mar Caribe (WANG, CHUNZAI, 2007) con

velocidades de hasta 11 m/s, proveniente del oeste; estos vientos generaron cambios evidentes en la altura significativa del oleaje.

El anterior comportamiento se replica durante las segundas quincenas de los meses de noviembre y diciembre, coincidentes con la transición de la época de lluvias hacia la época seca (en este periodo la zona de convergencia intertropical se mueve hacia el sur).

Debido a la discontinua información del oleaje y la necesidad de conocer el desempeño del modelo del Caribe durante los meses no medidos por el CIOH, se compararon gráficamente los resultados de las simulaciones del año 2009, con respecto a los datos del reconocido modelo Wave Watch III (WWIII), y se encontraron resultados similares.

En la Figura 7.3 y la Figura 7.4 , se puede ver que durante los periodos de calibración las alturas significativas fueron cercanas a los datos de las boyas del CIOH y WWIII, menos al final de diciembre de 2009, cuando parece que hubo diferencias entre la malla de vientos y la realidad.

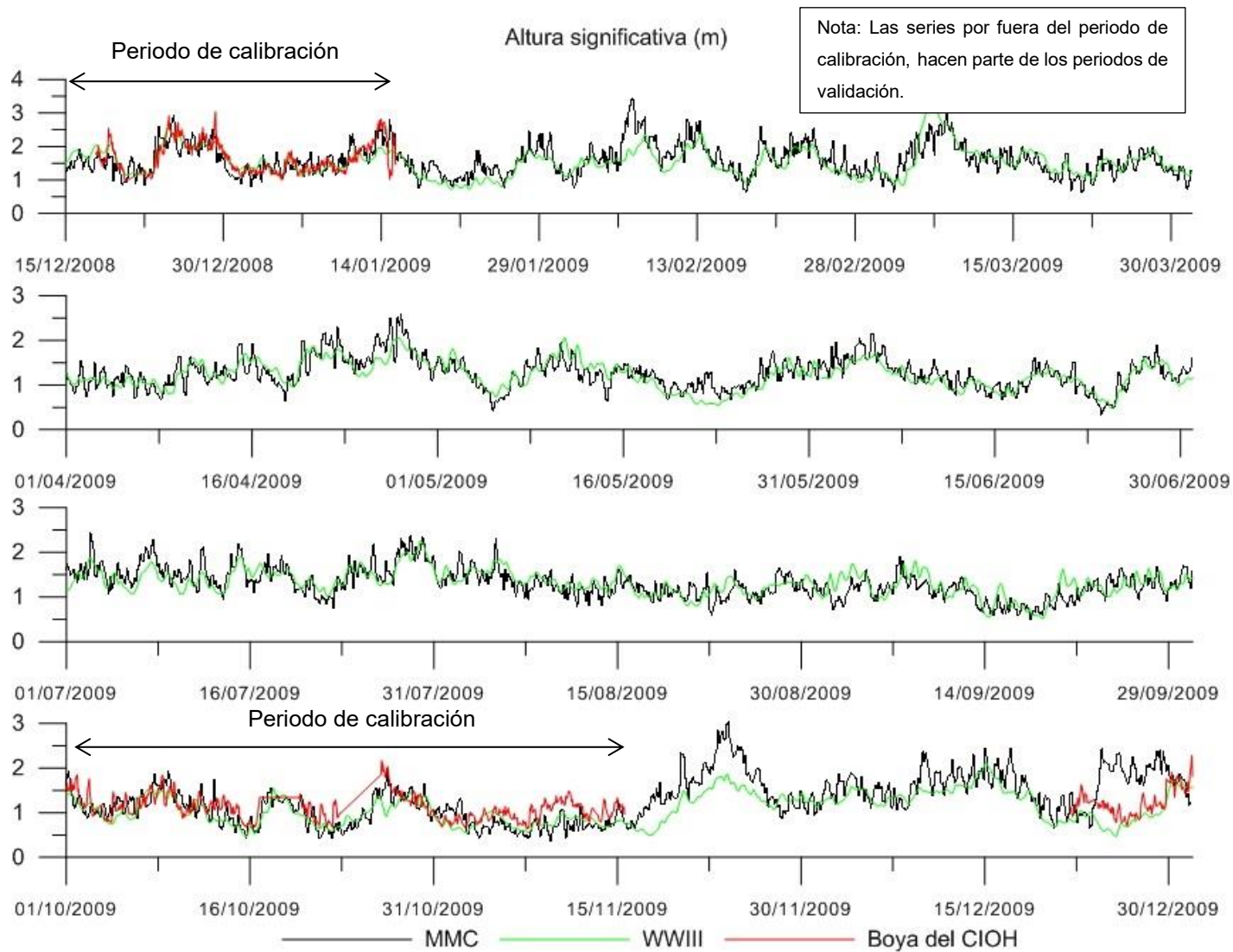


Figura 7.3 El Oleaje medido y el simulado por el Modelo del Caribe y por el WWIII en Puerto Bolívar.

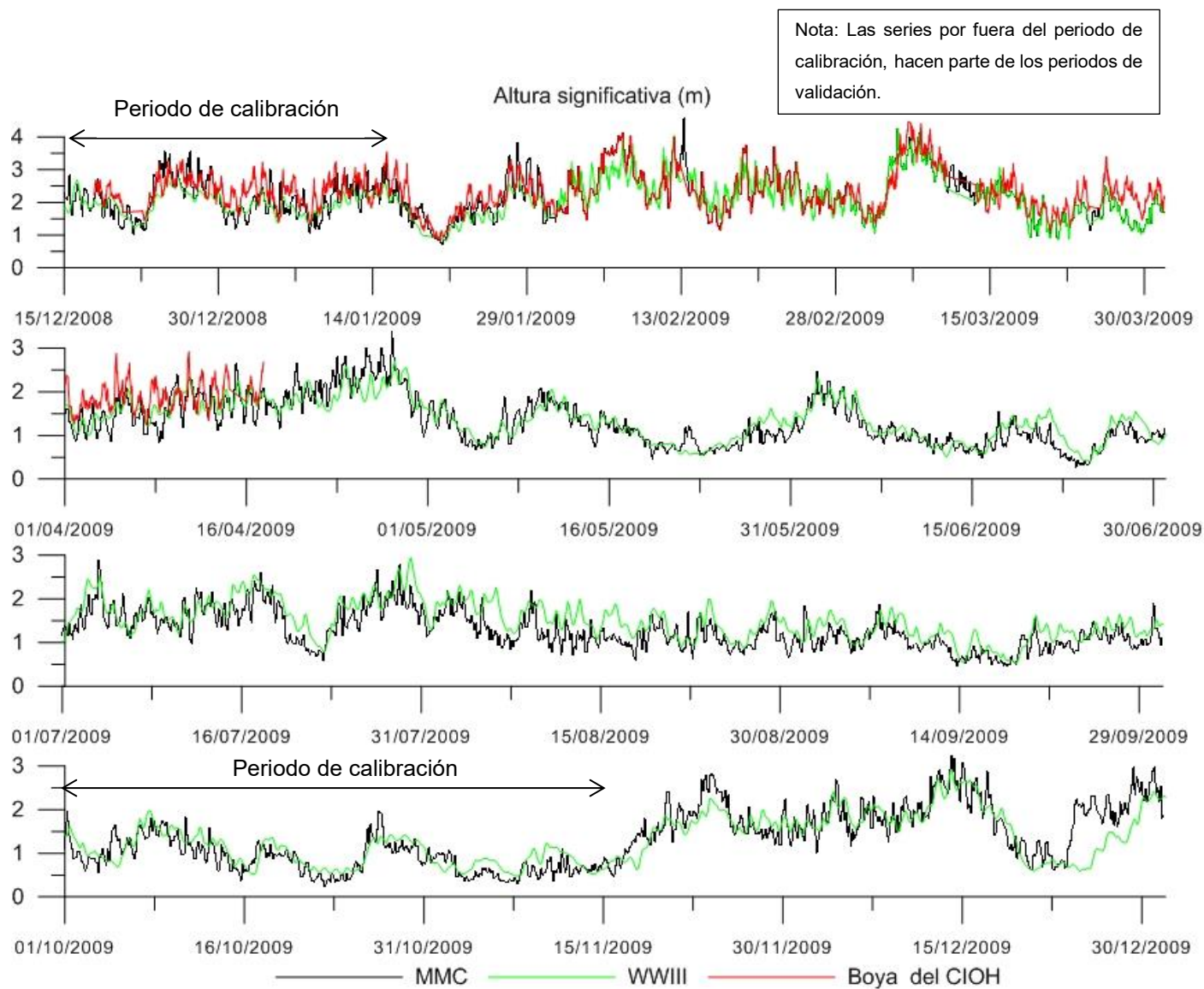


Figura 7.4 El Oleaje medido y el simulado por el Modelo del Caribe y por el WWIII en Barranquilla.

Los bajos errores encontrados con respecto a los datos de las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar, unidos a la similitud entre los resultados del WWIII y los del modelo, y que los patrones del oleaje siguen trayectorias de oriente a occidente al norte del área de estudio y oleajes con trayectorias nororiente a suroccidente desde la Guajira hacia el sur, similares a los encontradas por publicaciones como LERMA, ALEXANDER NICOLAE et al. (2012), permiten concluir que el modelo arroja resultados cercanos a las de otras publicaciones y que es adecuado para caracterizar el oleaje.

7.7 VALIDACIÓN DE LAS MAREAS

Para validar los niveles de las mareas, se modeló el mes de septiembre de 1994 con el modelo ya calibrado y se encontró que, según los RMAE, las simulaciones de los niveles de marea se pueden calificar como excelentes (ver Tabla 5.1) en los puntos de control de los tres mareógrafos (Tabla 7.22).

Aunque los anteriores resultados son buenos, se cuantificó la relación entre los valores del RMS y el MAE, con respecto a los valores de las amplitudes máximas de las mareas, y se encontró que las desviaciones de los resultados y las diferencias medias con respecto a las mediciones en todos los resultados no superan el 20% con respecto a los rangos de marea (Tabla 7.22).

Tabla 7.22 Errores de las mareas simuladas con el modelo en 2D con respecto a las mediciones de mareas.

Mareógrafos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	Amplitud Máx. (m)	RMS/Amplitud Máx.	MAE/Amplitud Máx.
Cartagena	0,040	0,032	14,18%	0,40	10,07%	8,02%
La Guaira	0,063	0,049	3,14%	0,40	15,67%	12,21%
San Cristóbal	0,052	0,040	6,19%	0,43	12,15%	9,34%

Los resultados de un modelo continental como el del mar Caribe están sujetos a imprecisiones en las zonas costeras, debido a que las condiciones batimétricas locales cambian en longitudes menores a la resolución de la malla del modelo. Y a algunas imprecisiones en las bases de datos del viento y presiones atmosféricas, que pueden afectar los resultados finales de la simulación de la marea meteorológica.

Los errores presentados en la Tabla 7.22 son muy bajos, ya que no superan el 20% al dividir el MAE por la amplitud y, si se considera este como un RMAE modificado, el modelo se puede calificar de excelente. Esta buena similitud entre los resultados se puede apreciar en las gráficas a continuación, donde se ve cómo el modelo predice bien las mareas durante el periodo de calibración y durante los periodos de validación.

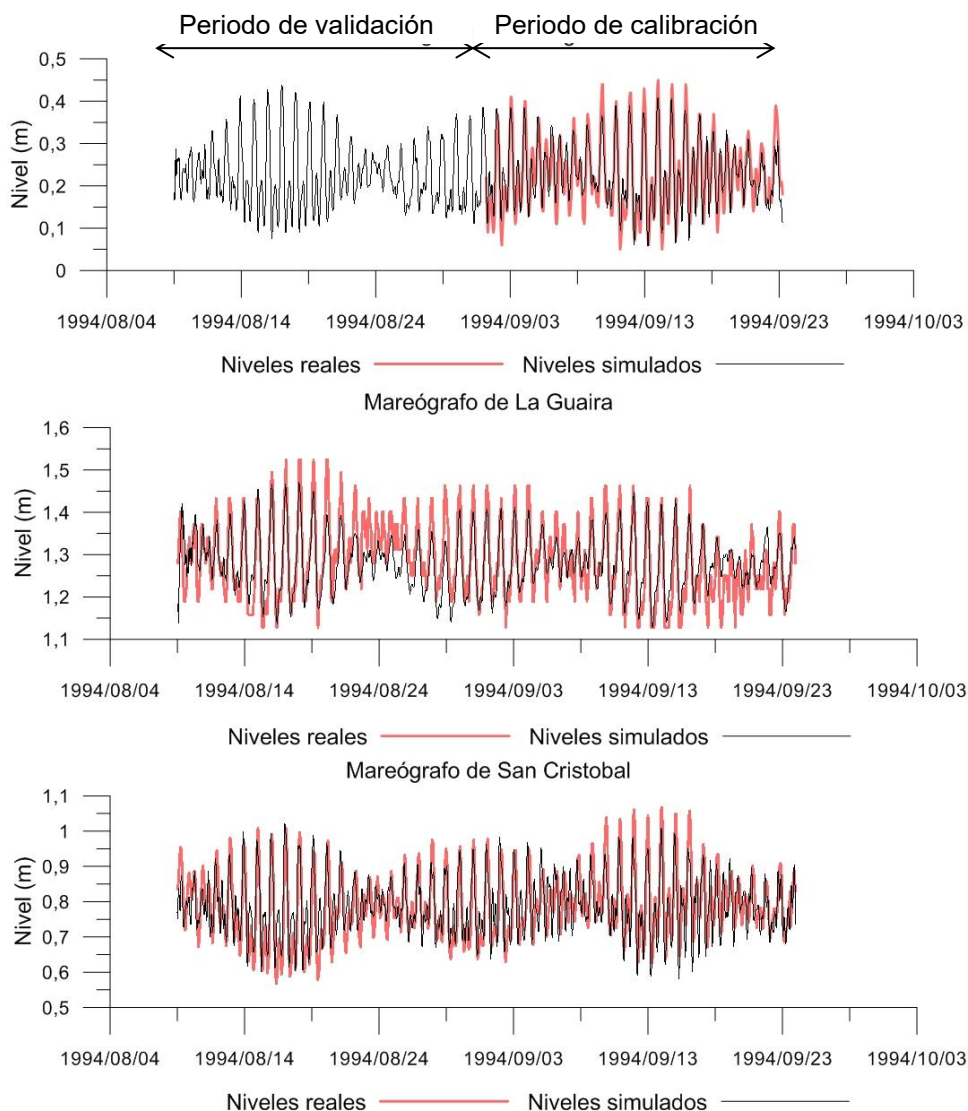


Figura 7.5 Niveles de marea para los periodos de calibración y validación del modelo en Cartagena, La Guaira y San Cristóbal

Los niveles de las mareas encontrados tienen una magnitud similar a los medidos por los mareógrafos, con diferencias hasta de 5 cm con respecto a los máximos, durante toda la simulación. Sin embargo, los resultados del modelo tienen un desfase temporal de 4 minutos para Cartagena, de menos 5 minutos para La Guaira y de 50 minutos para San Cristóbal.

Al poner en fase las series temporales simuladas y las reales, desplazándolas temporalmente, se encontraron altos coeficientes de determinación en los puntos de los mareógrafos (ver Figura 7.6). Y las medias de las series para una probabilidad del 5% son iguales.

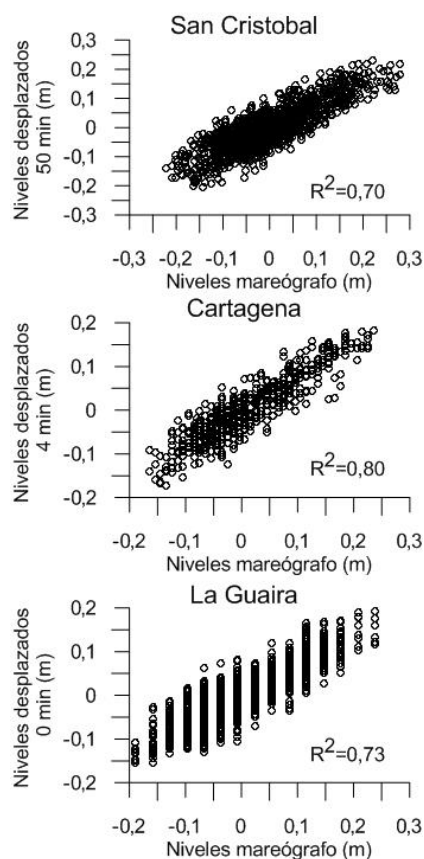


Figura 7.6 Niveles del mar simulados vs. los niveles medidos

Los desfases en las mareas pueden ser debidos a los cambios locales de la batimetría de las bahías y puertos donde se encuentran los mareógrafos, Los resultados del modelo

podrían mejorar aún más, si se contara con información batimétrica detallada de estas zonas.

En general, la marea a lo largo del litoral continental del Caribe colombiano presentó un comportamiento uniforme. Sin embargo, se encontró en el análisis de mareas que en las componentes asociadas a la variación semidiurna de la marea M_2 (lunar principal), S_2 (solar principal) y N_2 (elíptica lunar) hay un incremento gradual de la amplitud en dirección sur. Este comportamiento se repite igualmente para la componente sobre mareal MS_4 .

Esta tendencia no se cumple al analizar la isla de San Andrés, debido a que allí se presentan las mayores amplitudes en las componentes M_2 , S_2 , N_2 y MS_4 . La fase de las componentes astronómicas presentó la menor variabilidad espacial a lo largo del litoral Caribe colombiano. Las únicas discrepancias de relevancia se presentaron en Puerto Bolívar para las componentes M_4 , MS_4 y MN_4 (POSADA JARAMILLO, FEDERICO y ESCOBAR SIERRA, CARLOS A., 2012) (ver Figura 7.7).

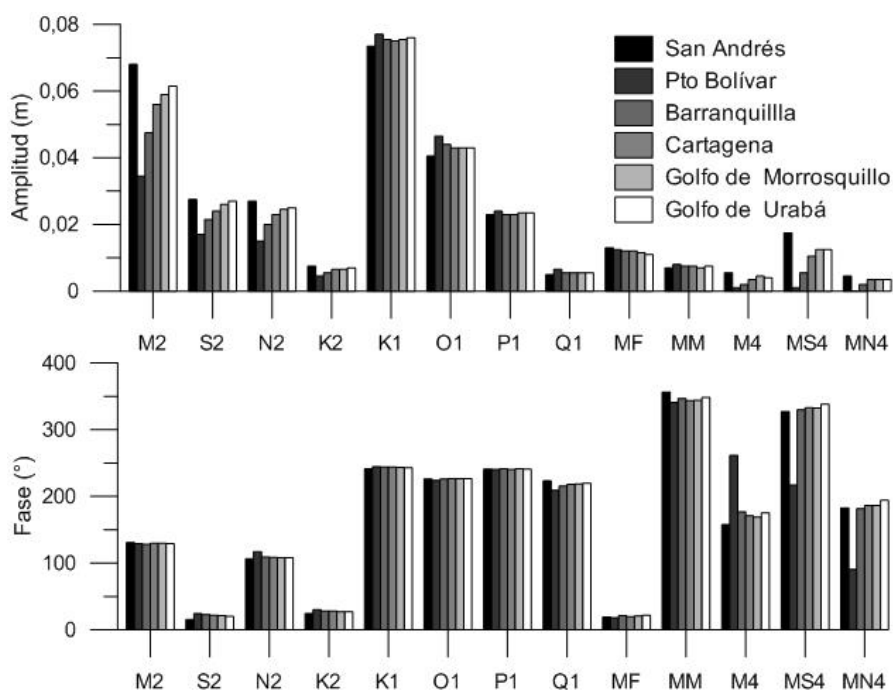


Figura 7.7 Variación de las mareas en el Caribe Colombiano durante 2009 (POSADA JARAMILLO, FEDERICO y ESCOBAR SIERRA, CARLOS A., 2012).

El modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe demostró que tiene una buena calificación dentro de los parámetros establecidos para la simulación de las mareas y el oleaje. Sin embargo, dentro del dominio del modelo, las corrientes y el oleaje interactúan, y este proceso de intercambio de momentum es difícil de validar a partir de mediciones, ya que no se cuenta en el momento con mediciones completas de las corrientes, mareas y oleaje en la misma temporada, para todo el dominio.

7.8 VALIDACIÓN DE LAS CORRIENTES

Con el fin de validar los patrones de corrientes superficiales del Caribe, y verificar cual era el efecto de la premediación de las velocidades en la columna de agua, la malla bidimensional del modelo se convirtió en una malla sigma de 4 capas o con capas definidas por un porcentajes de la altura de agua, donde la primera capa representa un 1% de la columna de agua, las siguientes dos representan un 10 % cada una y el fondo del modelo o la capa inferior es un 79%.

La primera simulación realizada con el modelo en tres dimensiones fue la del mes de agosto de 1994, que se realizó con la intención de calcular los errores estadísticos de las mareas con respecto a los mareógrafos. Esto se hizo con la intención de conocer los cambios en los resultados debido al cambio en la malla.

Tabla 7.23 Errores de las mareas simuladas con el modelo 3D con respecto a las mediciones de mareas.

Mareógrafos	RMS (m)	MAE (m)	RMAE	Amplitud Máx. (m)	RMS/Amplitud Máx.	MAE/Amplitud Máx.
Cartagena	0,03984	0,03186	12,30%	0,40	17,32%	13,85%
La Guaira	0,06610	0,05363	6,80%	0,40	13,06%	16,45%
San Cristóbal	0,04867	0,03874	3,01%	0,43	8,87%	9,76%

En la tabla anterior se encontró una mejoría en los resultados de las mareas en los puntos de control de los mareógrafos de La Guaira y San Cristóbal, lo que quiere decir que los valores están más cercanos a la media de los datos de estos dos mareógrafos.

Al calificar las simulaciones con el RMAE modificado o MAE/Amplitud Max., se encuentra que en general el modelo sigue siendo bueno para simular las mareas. Esto permite continuar hacia el análisis de los patrones de corrientes superficiales.

Se realizaron simulaciones de la época seca del 2009 y de lluvias del 2010; esta última se simuló con la intención de conocer las corrientes superficiales durante una temporada húmeda típica en el Caribe, ya que durante el año 2009 en el segundo semestre no se presentaron los vientos típicos del sur, que entran por el golfo de Urabá (GARCÍA VALENCIA, CAROLINA y SIERRA CORREA, PAULA C., 2007). Se encontró que la corriente del Caribe descrita por GORDON, ARNOLD L. (1967) y también el patrón de corriente superficial medido utilizando boyas a la deriva por RICHARDSON, P. L. (2005), coinciden con la corriente simulada por el modelo.

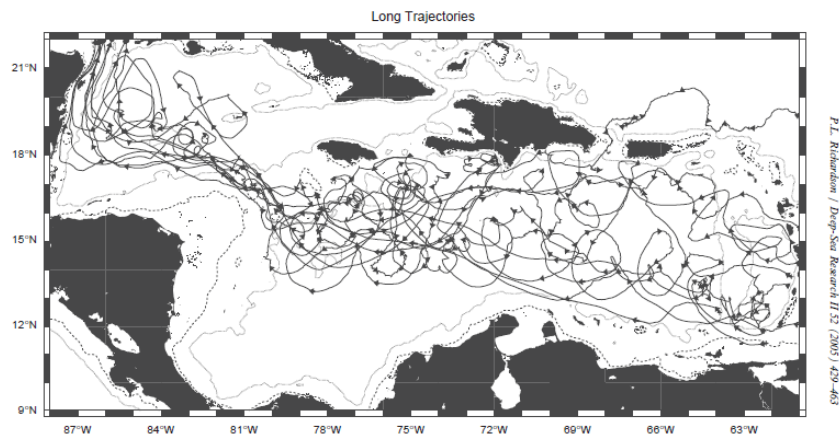


Figura 7.8 Mediciones de la corriente del Caribe (RICHARDSON, P. L., 2005).

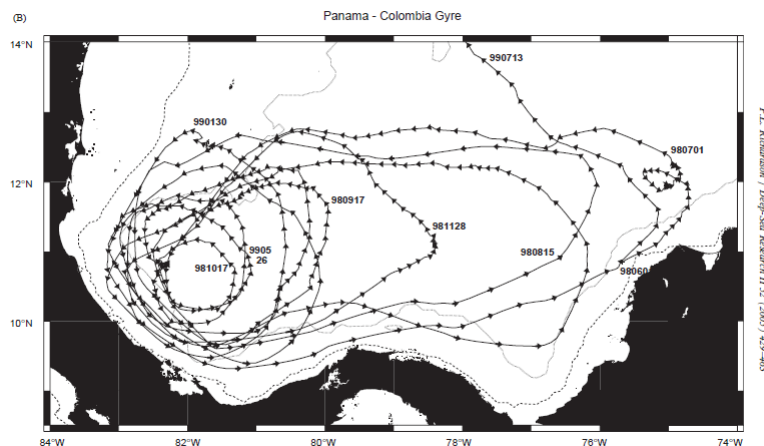


Figura 7.9 Mediciones del giro Panamá - Colombia Caribe (RICHARDSON, P. L., 2005).

La corriente del Caribe y el Giro Panamá - Colombia inclusive tienen magnitudes de velocidades superficiales con un orden de magnitud similar a las encontradas en los perfiles de ADCP de ANDRADE, CARLOS ALBERTO et al. (2003), donde este último observó velocidades superficiales de 0,5 a 0,6 m/s en la corriente del Caribe cerca de la península de la Guajira en Colombia, en el mes de abril de 1998 y, en el mismo proyecto ANDRADE, CARLOS ALBERTO et al. (2003) encontró velocidades superficiales cercanas a los 0,3 m/s del Giro Panamá - Colombia cerca de San Cristóbal en Panamá, en julio de 1998.

Magnitudes de corrientes similares se pueden observar en la siguiente figura y fueron característicos durante la simulación de la época seca:

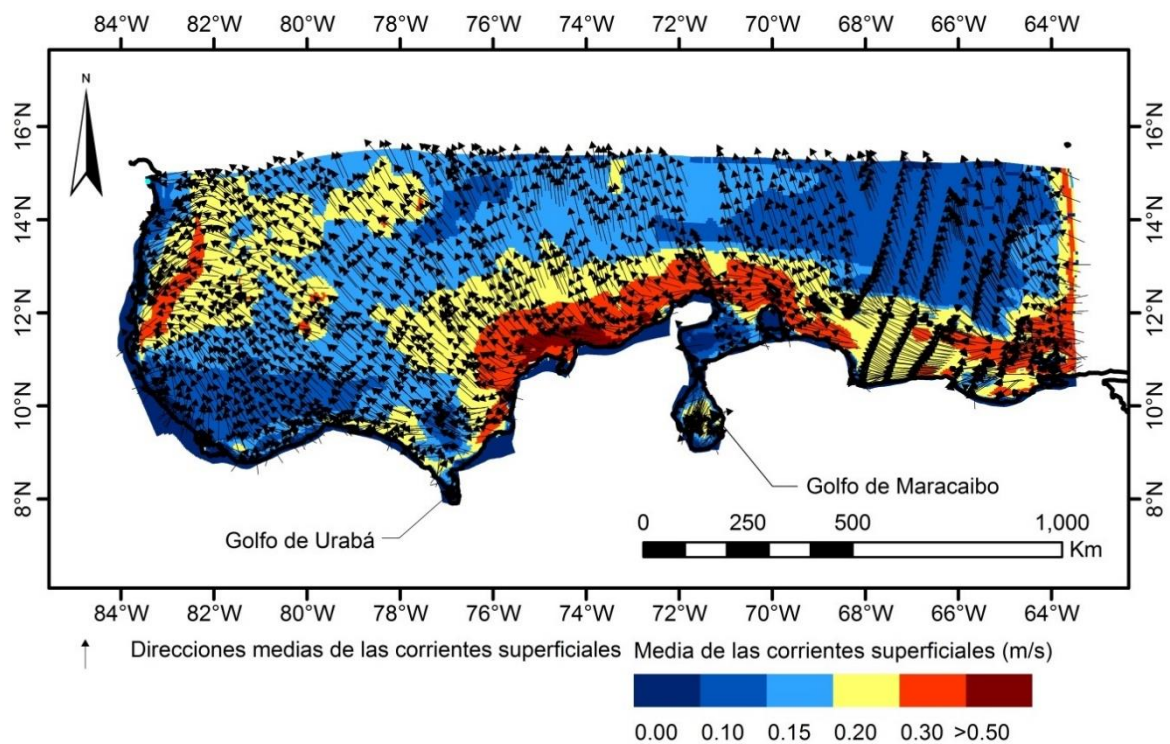


Figura 7.10 Velocidades y direcciones medias de las corrientes superficiales durante la época seca del 2009.

Durante la época húmeda del 2010, fueron predominantes los vientos del sur, que generaron direcciones medias de las corrientes superficiales de sur a norte como se puede ver a continuación:

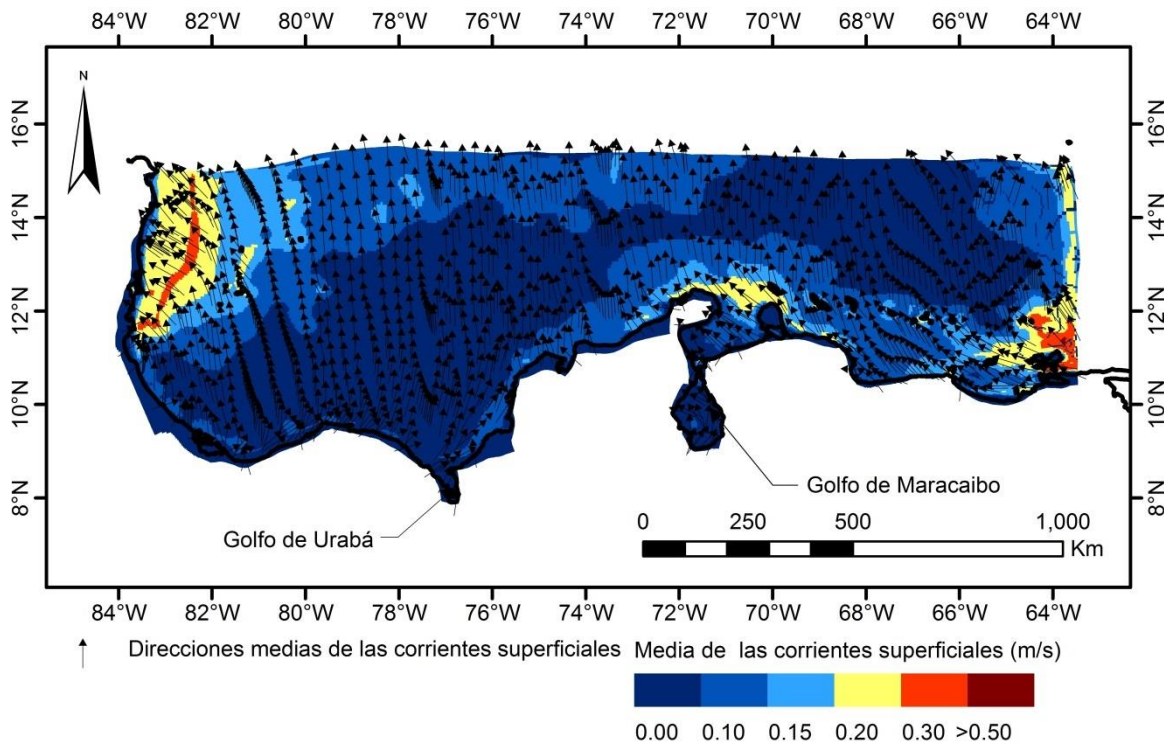


Figura 7.11 Velocidades y direcciones medias de las corrientes superficiales durante la época húmeda del 2010.

El modelo del mar Caribe no solo simula el oleaje y las mareas, sino que representa de forma adecuada las magnitudes de las velocidades de las corrientes superficiales durante los meses de la época seca y de lluvias.

Durante la época seca, los vientos fuertes aceleraron las corrientes superficiales al sur de las Antillas cerca de las costas venezolanas, generando corrientes superficiales con velocidades altas, que se unieron a la corriente del Caribe, comportamiento que no se observó durante la época húmeda.

Con el modelo no se obtuvieron buenos resultados en cuanto a las direcciones de las corrientes ya que algunas de estas están influenciadas con los cambios termohalinos que se dan dentro del mar Caribe, parámetro que no fue evaluado durante el desarrollo de este modelo y se dejó como una tarea a realizar en futuras investigaciones.

8. APLICACIONES

Los procesos de calibración y validación del modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe arrojaron resultados satisfactorios en cuanto a la simulación de los niveles de las mareas meteorológicas, el oleaje y las corrientes.

Aprovechando estos buenos resultados, se experimentó con algunas condiciones extras que, aunque son comunes en el área de estudio, no están ligadas a una sola variable sino más bien a interacciones o a condiciones máximas que afectan a varios de los forzadores al mismo tiempo, y por ende los resultados del modelo.

En ese contexto y con el fin de conocer la relación que el swell tiene con el oleaje en el litoral Caribe colombiano, se analizó la capacidad del modelo de propagar el swell durante las épocas seca y húmeda del 2009, así como durante el paso de los huracanes Dean y Félix en 2007,

Se evaluó también, para las dos temporadas seca y húmedas del 2009, la interacción entre el oleaje y las corrientes superficiales, cuantificando los cambios en las alturas significativas y las velocidades superficiales y delimitando las zonas donde es más fuerte esta interacción dentro del área de estudio.

Con la intención de conocer el funcionamiento del modelo al simular el paso de grandes tormentas, fue modelado el paso del huracán Joan que pasó por el Caribe en octubre de 1988 y causó daños de consideración en las poblaciones costeras colombianas y centroamericanas. En esta simulación se conocieron los cambios en el oleaje y las mareas generadas por este huracán.

Por último, se analizaron las alturas significativas del oleaje en varios puntos en el litoral Caribe colombiano durante el paso de los frentes fríos del año 2009, con la intención de conocer el funcionamiento bajo estas condiciones climáticas.

Estas aplicaciones se presentan a continuación:

8.1 EFECTOS DEL SWELL EN EL OLEAJE LOCAL.

El análisis propuesto evalúa los errores en los que se podría incurrir en la modelación debido a que no se cuenta con esta variable en las simulaciones, que es útil porque el swell es medido con boyas direccionales, las cuales a veces paran de medir por el paso de tormentas o por los periodos de mantenimiento preventivo.

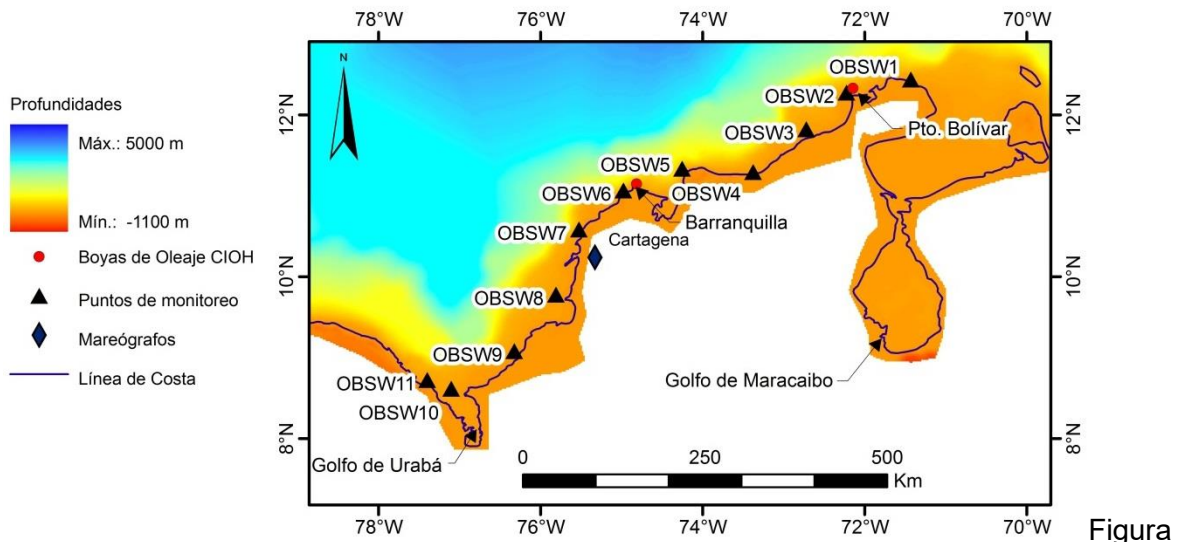
Con el fin de conocer la influencia de este fenómeno en el Caribe colombiano, y los efectos que tienen los fenómenos exógenos en el oleaje dentro del modelo, se evaluaron tres intervalos de tiempo que cubren tres condiciones meteorológicas distintas: la época seca, la época de lluvias y la temporada de huracanes (Tabla 8.1), analizando las series de oleaje con y sin swell evaluando por medio de pruebas T y F, y funciones de ajuste con valores Dummies la similitud entre los datos y la presencia de eventos presentes solo en los resultados debidos a la inclusión del Swell.

Tabla 8.1 Periodos simulados para evaluar la influencia del swell en el Caribe.

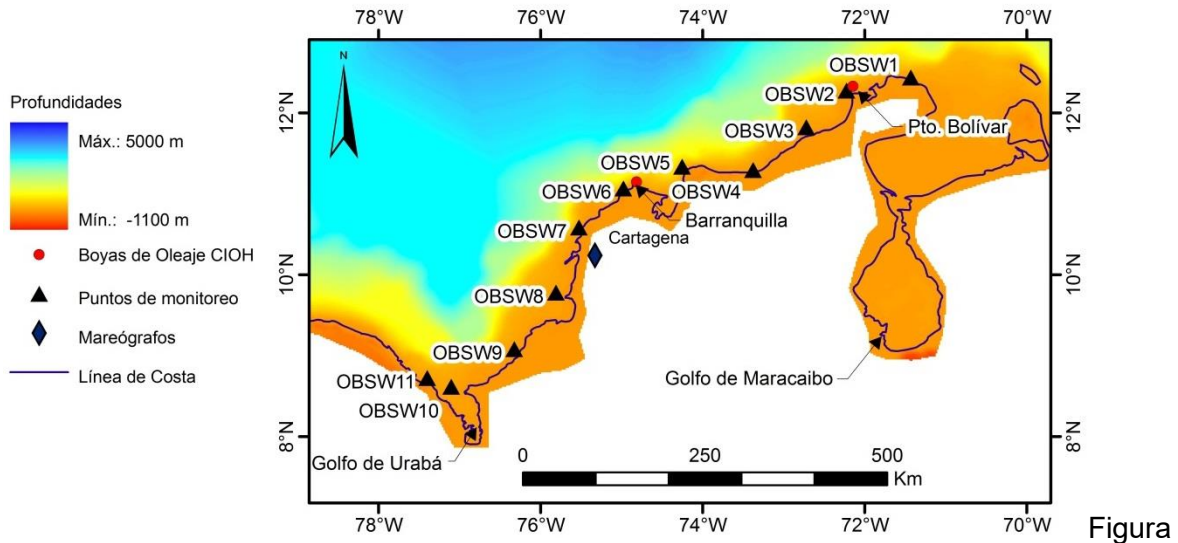
Fecha inicial	Fecha final	Temporada
01/07/2007	15/09/2007	Huracanes Dean y Félix
15/12/2008	20/04/2009	Época seca
15/09/2009	31/12/2009	Época de lluvias

El periodo de la temporada de huracanes fue elegido debido al paso de los huracanes Dean y Félix por la frontera norte del modelo y cerca de Punta Gallinas en la península de la Guajira respectivamente. Estos dos huracanes tuvieron las trayectorias más cercanas al territorio continental colombiano en los últimos años (ver la Figura 8.2 y la Figura 8.3).

Luego de definir los periodos de evaluación, para conocer los efectos del swell en el Caribe colombiano se ubicaron 11 puntos de monitoreo a lo largo de la franja costera continental colombiana, espaciados entre si aproximadamente 140 km (



8.1). Se ubicaron además dos puntos adicionales en las coordenadas de las boyas direccionales de Barranquilla y Puerto Bolívar.



8.1 Puntos donde se analizó el swell en el litoral Caribe colombiano.

Las primeras comparaciones entre las simulaciones con el swell y sin este, se hicieron utilizando una prueba T pareada para la comparación de las medias y una prueba F para la comparación de las varianzas. Posteriormente, se generaron funciones de ajuste entre los modelos con y sin swell. Dentro de estas funciones se incluyó una variable Dummy, la cual referencia los picos en el oleaje de la simulación con swell, con el fin de comprobar si estos

picos eran estadísticamente significativos en las diferencias entre las dos series de tiempo. Estas funciones de ajuste se obtuvieron con el software Eviews7 y tienen la siguiente forma:

$$Hssinswell = C1 + C2 * Hsconswell + C3 \cdot HsDummy \quad (8.1)$$

$$Tpsinswell = C1 + C2 * Tpconswell + C3 \cdot TpDummy \quad (8.2)$$

Donde:

Hssinswell y *Tpsinswell*: Alturas significativas (m) y Periodos al pico (s) encontrados en las simulaciones sin swell.

Hsconswell y *Tpconswell*: Alturas significativas (m) y Periodos al pico (s) encontrados en las simulaciones con swell.

HsDummy y *TpDummy*: Variables binarias dummie, que toman el valor de 1 si hay picos en la serie con swell, no encontrados en la serie sin swell.

C1, C2 y C3: Son los coeficientes de las ecuaciones de ajuste, a los cuales se les puede medir la probabilidad de existencia.

Es común encontrar que algunos de estos picos en las series se relacionan con fenómenos meteorológicos que afectan el swell, como el paso de huracanes y los cambios bruscos en el viento debido a frentes fríos.

La variable binaria llamada Dummy, multiplicada por el coeficiente C3, permite por medio de una prueba T calcular la probabilidad de que el coeficiente que multiplica la variable sea 0, y por ende si los picos o eventos especiales son importantes para relacionar las dos series temporales. Lo anterior se complementó con el cálculo de la correlación circular entre las series direccionales (CCC) (FISHER, NICHOLAS I., 1993) la cual toma el valor de 1 para una relación directa y -1 para una relación inversa entre las series.

$$CCC = \frac{\sum_{1 \leq i \leq j \leq N} \sin(x_i - x_j) \sin(y_i - y_j)}{\sqrt{\sum_{1 \leq i \leq j \leq N} \sin(x_i - x_j)^2 \sum_{1 \leq i \leq j \leq N} \sin(y_i - y_j)^2}} \quad (8.3)$$

En la ecuación (8.3) las x son los valores de la serie patrón y las y de la modelación modificada, y la i y la j representan instantes en el tiempo.

Luego de encontrar que había diferencias entre los modelos con swell y sin este, se cuantificaron las diferencias de las simulaciones con y sin swell, utilizando los mismos indicadores planteados en las metodologías de calibración del modelo, unidos a una comparación de las modas estadísticas de las direcciones en los puntos de control.

8.1.1 El swell en la época seca en el mar Caribe

Dentro del área de estudio y en las áreas cercanas al dominio, la época seca está dominada por vientos con velocidades altas, lo cual hace necesario analizar la importancia del oleaje externo durante este periodo. Las series de las alturas significativas y los periodos al pico de las simulaciones con swell y sin swell se compararon con fueron con pruebas T y F, encontrándose que las series tenían varianzas iguales para un 95% de confiabilidad y medias diferentes para un 95% de confiabilidad, en los trece puntos de control.

Se utilizaron las ecuaciones de ajuste con variables Dummy para comparar las series de tiempo de Hs y Tp, y para revisar si los picos generados por el swell generaban diferencias estadísticamente significativas o no, entre las series.

Tabla 8.2 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las Hs de la época seca.

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	-0,11	0,00	0,91	0,00	-0,44	0,00	0,90
Puerto Bolívar	-0,14	0,00	0,93	0,00	-0,38	0,00	0,92
2	-0,12	0,00	0,93	0,00	-0,37	0,00	0,92
3	-0,18	0,00	1,00	0,00	-0,42	0,00	0,93
4	-0,11	0,00	0,98	0,00	-0,37	0,00	0,93
5	-0,20	0,00	1,01	0,00	-0,57	0,00	0,95
Barranquilla	-0,16	0,00	1,00	0,00	-0,57	0,00	0,95
6	-0,15	0,00	1,00	0,00	-0,55	0,00	0,96
7	-0,07	0,00	1,01	0,00	0,00	1,00	0,98
8	-0,04	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,98
9	-0,04	0,00	0,99	0,00	0,00	1,00	0,98
10	-0,03	0,00	0,98	0,00	0,00	1,00	0,97
11	-0,07	0,00	0,98	0,00	-0,44	0,00	0,96

Tabla 8.3 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp de la Época seca

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	0,67	0,00	0,78	0,00	-0,94	0,00	0,66
Puerto Bolívar	0,35	0,00	0,84	0,00	-0,85	0,00	0,76
2	0,29	0,00	0,86	0,00	-0,85	0,00	0,76
3	0,19	0,00	0,89	0,00	-0,84	0,00	0,83
4	0,13	0,00	0,91	0,00	0,91	0,00	0,85
5	-0,07	0,02	0,98	0,00	-1,17	0,00	0,94
Barranquilla	-0,07	0,02	0,97	0,00	-1,31	0,00	0,94
6	-0,07	0,01	0,98	0,00	-1,32	0,00	0,94
7	-0,12	0,00	1,00	0,00	-1,17	0,00	0,96
8	-0,16	0,00	1,01	0,00	-1,00	0,00	0,96
9	-0,17	0,00	1,01	0,00	-1,05	0,00	0,97
10	-0,11	0,00	0,99	0,00	-1,24	0,00	0,97
11	-0,09	0,00	0,98	0,00	-1,46	0,00	0,96

Nota: $P(C1=0)$, $P(C2=0)$ y $P(C3=0)$ son las probabilidades de que los coeficientes sean iguales a cero.

En las series de las alturas significativas en el sur del litoral Caribe colombiano no hay picos estadísticamente importantes generados por el swell. Sin embargo, las comparaciones entre las series de período al pico presentan una influencia del swell en los picos de las series, por lo que se puede decir que hay influencia del swell en el oleaje local, debido a los cambios del oleaje al norte del Caribe.

Las diferencias entre las series de direcciones del oleaje se midieron utilizando la estadística circular para calcular el CCC.

Tabla 8.4 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones de la época seca.

Punto de monitoreo	CCC
1	0,63
Puerto Bolívar	0,73
2	0,74
3	0,83
4	0,86
5	0,91
Barranquilla	0,86
6	0,89
7	0,87
8	0,93
9	0,95
10	0,96
11	0,96

Se puede afirmar que los CCC (Coeficientes de correlación Circular) se aproximan a 1, y que los datos direccionales de las dos simulaciones tienen una relación proporcional o directa. Esto indica que la dirección del oleaje durante esta época seca en el litoral Caribe

colombiano está relacionada con el viento dentro del dominio del modelo, debido a que el swell no es significativamente influyente en la dirección del oleaje en esta temporada.

8.1.2 El swell en la época de lluvias en el mar Caribe

Con las pruebas F y T pareadas se encontró que, para un 95% de confiabilidad, las varianzas y las medias de las series de Hs y Tp con y sin swell son diferentes. Lo anterior es reforzado por las ecuaciones de ajuste entre las series (ecuaciones (8.1) y (8.2), que evidencian que tanto la Hs como el Tp durante este periodo presentan picos en las series debidos a los efectos del swell. Esto es evidente en la Tabla 8.5 y Tabla 8.6, en las cuales se observa que la probabilidad de no existencia de la variable Dummy es 0 para todos los puntos de monitoreo, por lo que el swell es un fenómeno importante para la modelación de la época de lluvias en el mar Caribe.

Tabla 8.5 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las Hs de la época de lluvias.

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	-0,34	0,00	1,09	0,00	-0,41	0,00	0,93
Puerto Bolívar	-0,35	0,00	1,12	0,00	-0,32	0,00	0,93
2	-0,34	0,00	1,12	0,00	-0,30	0,00	0,93
3	-0,35	0,00	1,18	0,00	-0,38	0,00	0,94
4	-0,31	0,00	1,20	0,00	-0,30	0,00	0,94
5	-0,45	0,00	1,18	0,00	-0,63	0,00	0,96
Barranquilla	-0,44	0,00	1,19	0,00	-0,55	0,00	0,95
6	-0,44	0,00	1,19	0,00	-0,64	0,00	0,95
7	-0,29	0,00	1,16	0,00	-0,57	0,00	0,96
8	-0,19	0,00	1,16	0,00	-0,33	0,00	0,94
9	-0,23	0,00	1,17	0,00	-0,34	0,00	0,94
10	-0,23	0,00	1,15	0,00	-0,37	0,00	0,95
11	-0,28	0,00	1,17	0,00	-0,38	0,00	0,94

Tabla 8.6 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp de la época de lluvias.

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	-0,50	0,00	1,03	0,00	-1,23	0,00	0,71
Puerto Bolívar	0,80	0,00	0,74	0,00	-1,03	0,00	0,58
2	0,79	0,00	0,74	0,00	-0,99	0,00	0,59
3	0,00	0,98	0,94	0,00	-0,79	0,00	0,68
4	-0,08	0,19	0,96	0,00	-0,93	0,00	0,72
5	-0,27	0,00	0,99	0,00	-1,16	0,00	0,68
Barranquilla	-0,50	0,00	1,03	0,00	-1,23	0,00	0,71
6	0,70	0,00	1,00	0,00	-1,24	0,00	0,70
7	-0,44	0,00	1,05	0,00	-0,99	0,00	0,76
8	-0,48	0,00	1,06	0,00	-0,79	0,00	0,79
9	-0,79	0,00	1,10	0,00	-0,83	0,00	0,75
10	-0,87	0,00	1,10	0,00	-0,95	0,00	0,77
11	-0,89	0,00	1,09	0,00	-1,11	0,00	0,76

Nota: P(C1=0), P(C2=0) y P(C3=0) son las probabilidades de que los coeficientes sean iguales a cero.

Tabla 8.7 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones de la época de lluvias.

Punto de monitoreo	CCC
1	0,57
Puerto Bolívar	0,63
2	0,64
3	0,73
4	0,76
5	0,71
Barranquilla	0,63
6	0,65
7	0,61
8	0,64
9	0,67
10	0,60
11	0,45

En la comparación de las series direccionales de las dos simulaciones para la época de lluvias se observan CCC menores, lo que indica que es necesario considerar el swell para simular las condiciones de oleaje en el mar Caribe colombiano, ya que tiene efectos importantes sobre las alturas significativas y las direcciones del oleaje local.

8.1.3 El swell durante un periodo de huracanes

A su paso por el Caribe, los huracanes Dean y Félix tuvieron las siguientes trayectorias:

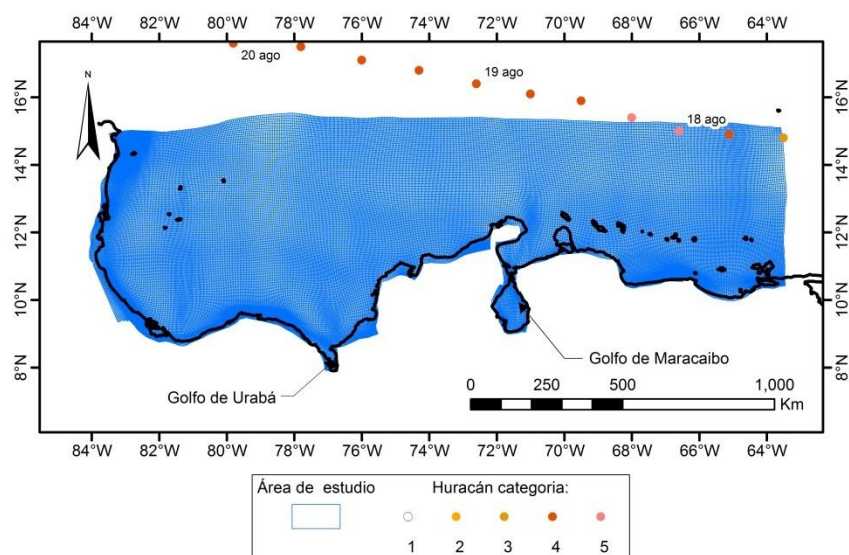


Figura 8.2 Recorrido del huracán Dean (18 al 28 de agosto, 2007)

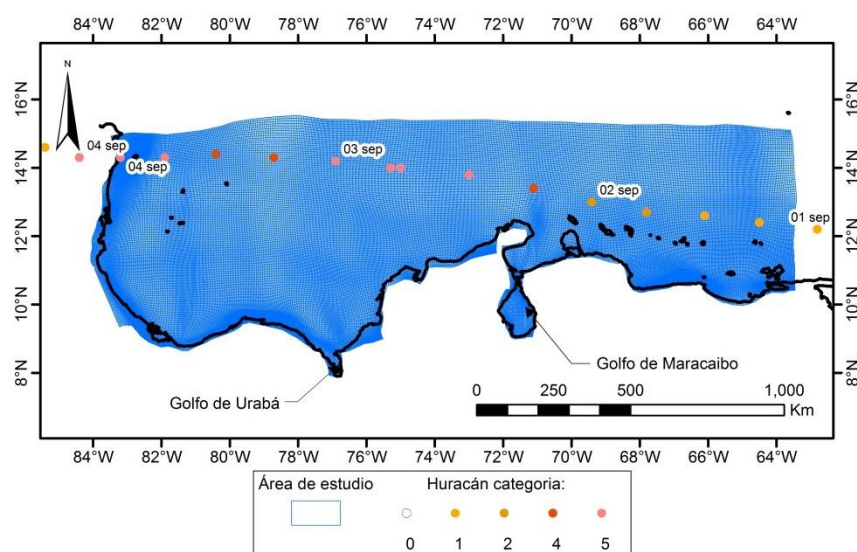


Figura 8.3 Recorrido del huracán Félix (1 al 9 de septiembre, 2007).

La categoría de los huracanes de las gráficas anteriores varía según las velocidades de los vientos y las alturas del oleaje, de acuerdo con la escala Saffir Simpson.

Utilizando el mismo procedimiento para analizar el swell durante la época seca y húmeda, durante el paso de los dos huracanes mencionados, se encontró que en las series de Hs y Tp con swell y sin este, para un 95% de confiabilidad, las varianzas y las medias de las series son distintas. Al comparar las series por medio de funciones de ajuste, se halló que el swell afecta de forma importante las series de altura significativa y periodo al pico, durante el paso de tormentas por el dominio del modelo o cerca de este. Debido a estos fenómenos se generaron olas con alturas significativas hasta de 5 m en la frontera del modelo, las cuales viajaron hasta llegar al Caribe Colombiano. Se encontró, además, que las probabilidades de no existencia de las variables Dummy son 0% (Tabla 8.8 y Tabla 8.9), lo cual confirma la importancia del swell generado por estos eventos en el mar Caribe.

Tabla 8.8 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para las Hs del periodo de huracanes.

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	0,36	0,00	0,66	0,00	-0,94	0,00	0,64
Puerto Bolívar	0,38	0,00	0,62	0,00	-1,09	0,00	0,62
2	0,37	0,00	0,62	0,00	-1,04	0,00	0,62
3	0,26	0,00	0,70	0,00	-1,42	0,00	0,65
4	0,30	0,00	0,60	0,00	-1,04	0,00	0,59
5	0,07	0,00	0,91	0,00	-2,54	0,00	0,88
Barranquilla	0,09	0,00	0,88	0,00	-2,51	0,00	0,86
6	0,09	0,00	0,88	0,00	-2,42	0,00	0,86
7	0,13	0,00	0,82	0,00	-1,55	0,00	0,81
8	0,17	0,00	0,74	0,00	-1,49	0,00	0,71
9	0,20	0,00	0,72	0,00	-1,15	0,00	0,69
10	0,23	0,00	0,67	0,00	-1,08	0,00	0,65
11	0,25	0,00	0,64	0,00	-0,92	0,00	0,64

Tabla 8.9 Coeficientes de las ecuaciones de ajuste para el Tp del Periodo de huracanes.

Punto de monitoreo	C1	P(C1=0)	C2	P(C2=0)	C3	P(C3=0)	R ²
1	1,59	0,00	0,60	0,00	-1,44	0,00	0,66
Puerto Bolívar	1,50	0,00	0,60	0,00	-1,46	0,00	0,63
2	1,43	0,00	0,61	0,00	-1,46	0,00	0,63
3	1,30	0,00	0,62	0,00	-1,47	0,00	0,60
4	1,27	0,00	0,63	0,00	-1,33	0,00	0,60
5	0,68	0,00	0,82	0,00	-1,78	0,00	0,82
Barranquilla	0,71	0,00	0,82	0,00	-1,79	0,00	0,83
6	0,72	0,00	0,81	0,00	-1,77	0,00	0,82
7	1,02	0,00	0,72	0,00	-1,47	0,00	0,75
8	1,23	0,00	0,64	0,00	-1,43	0,00	0,70
9	0,90	0,00	0,73	0,00	-1,77	0,00	0,76
10	0,97	0,00	0,71	0,00	-1,76	0,00	0,74
11	0,59	0,00	0,81	0,00	-2,29	0,00	0,80

Tabla 8.10 Coeficientes de correlación circular de las direcciones del oleaje entre las simulaciones durante los huracanes Félix y Dean.

Punto de monitoreo	CCC
1	0,82
Puerto Bolívar	0,87
2	0,87
3	0,91
4	0,89
5	0,88
Barranquilla	0,74
6	0,78
7	0,93
8	0,97
9	0,91
10	0,93
11	0,90

Se observan valores cercanos a 1 para los coeficientes de correlación circular (Tabla 8.10), lo cual se debe a que los huracanes pasaron por entre el dominio del modelo y estos vientos forzaron la dirección del oleaje.

Al analizarse en conjunto los resultados de las comparaciones de las alturas significativas, los periodos al pico y las direcciones, se concluye que es necesario considerar el swell para simular el oleaje durante el paso de los huracanes, y que estas tormentas tienen un efecto significativo en el oleaje local en todo el Caribe colombiano, estén o no dentro del dominio del modelo.

8.1.4 Comparación de los efectos del swell entre la época seca, la época de lluvias y el período de huracanes

En las gráficas a continuación se confrontan, a modo de resumen, los valores encontrados con las simulaciones incluyendo el swell y excluyéndolo para los diferentes periodos de evaluación. Se observa una dispersión mayor de los datos para el periodo de huracanes, la cual es generada por los oleajes altos que entraron por las fronteras permeables del modelo durante el paso de los huracanes Dean y Félix.

Aunque no se presentaron diferencias grandes, para los otros dos periodos climatológicos se hace notable cómo los oleajes simulados con el swell tuvieron alturas significativas mayores que la simulación patrón.

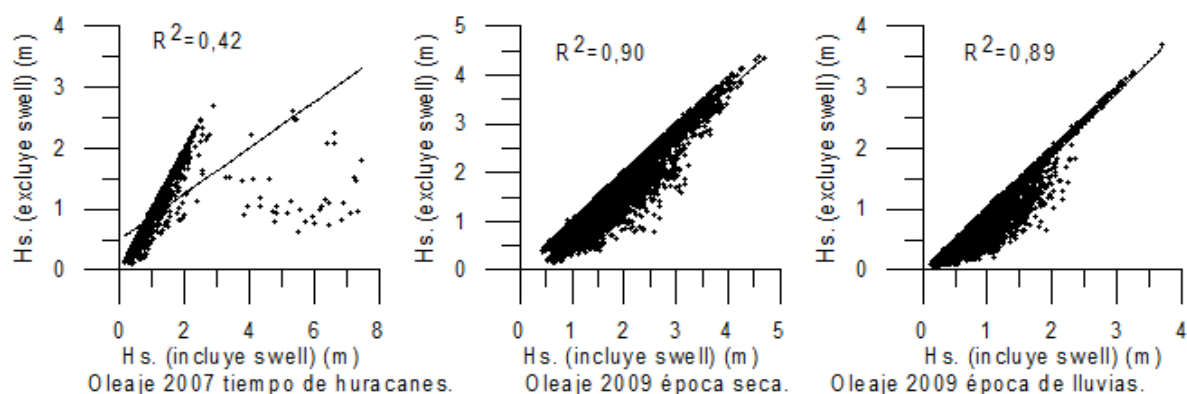


Figura 8.4 Comparación de las Hs. para los 13 puntos de monitoreo en todas las épocas.

En los diferentes periodos de monitoreo y con el fin de saber si el patrón de oleaje fue similar en los tres periodos de tiempo, y de analizar la relevancia del swell en las direcciones del oleaje del litoral Caribe colombiano, las direcciones predominantes del oleaje de las simulaciones se compararon utilizando las modas estadísticas de las series direccionales y las rosas de oleaje para los diferentes puntos de monitoreo

Tabla 8.11 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para la época seca.

Punto de monitoreo	Simulación incluyendo el swell.	Simulación excluyendo el swell.
	Dirección (°)	Dirección (°)
OBSW1	65,20	63,74
Pto. Bolívar	49,30	47,62
OBSW2	49,00	55,52
OBSW3	44,20	61,45
OBSW4	29,00	30,18
OBSW5	55,20	49,05
Barranquilla	44,70	37,33
OBSW6	41,40	44,70
OBSW7	21,50	21,85
OBSW8	354,00	4,04
OBSW9	357,00	0,17
OBSW10	359,00	358,07
OBSW11	18,60	23,22

Tabla 8.12 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para la época de lluvias.

Punto de monitoreo	Simulación incluyendo el swell.	Simulación excluyendo el swell.
	Dirección (°)	Dirección (°)
OBSW1	73,14	76,26
Pto. Bolívar	51,80	60,13
OBSW2	47,89	56,37
OBSW3	56,60	40,07
OBSW4	15,28	20,80
OBSW5	49,89	52,45
Barranquilla	37,83	37,05
OBSW6	32,17	35,79
OBSW7	5,96	7,81
OBSW8	327,08	324,02
OBSW9	340,80	327,15
OBSW10	359,17	350,62
OBSW11	20,07	5,52

Tabla 8.13 Modas direccionales del oleaje de las simulaciones para el periodo de huracanes.

Punto de monitoreo	Simulación incluyendo el swell. Dirección (°)	Simulación excluyendo el swell. Dirección (°)
OBSW1	73,97	74,21
Pto. Bolívar	61,35	61,21
OBSW2	50,62	57,53
OBSW3	42,23	41,92
OBSW4	21,67	21,19
OBSW5	37,00	37,49
Barranquilla	33,18	32,83
OBSW6	30,34	29,97
OBSW7	6,88	10,01
OBSW8	324,91	324,84
OBSW9	320,55	320,83
OBSW10	337,12	347,71
OBSW11	349,00	347,61

Las direcciones predominantes del oleaje no presentan cambios significativos para ninguna de las épocas (Tabla 8.11, Tabla 8.12 y Tabla 8.13). Se observa que el oleaje comienza con una dirección proveniente del noreste al norte de la costa Caribe colombiana y, al pasar cerca de la ciudad de Barranquilla, toma una dirección norte - sur. Este patrón se evidencia en las rosas de oleaje de estas tres épocas, las cuales muestran también una dispersión mayor de las direcciones del oleaje durante el periodo en el que pasaron cerca a la costa Caribe colombiana los huracanes Dean y Félix (Figura 8.5 y Figura 8.7).

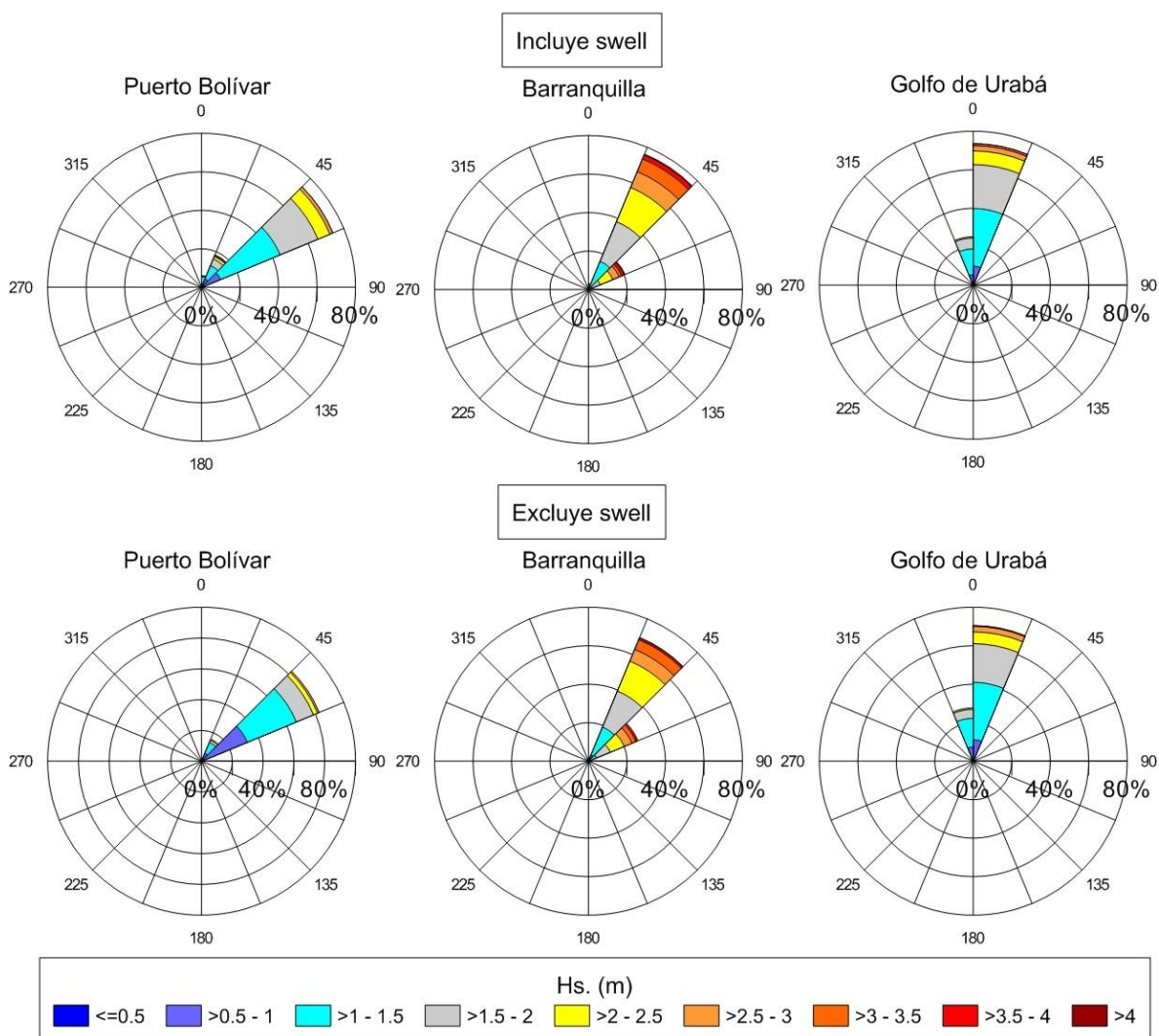


Figura 8.5 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell en la época seca.

En las simulaciones que incluyen el swell para la época seca se evidenció que las alturas significativas son mayores y que las direcciones no fueron afectadas significativamente por el swell.

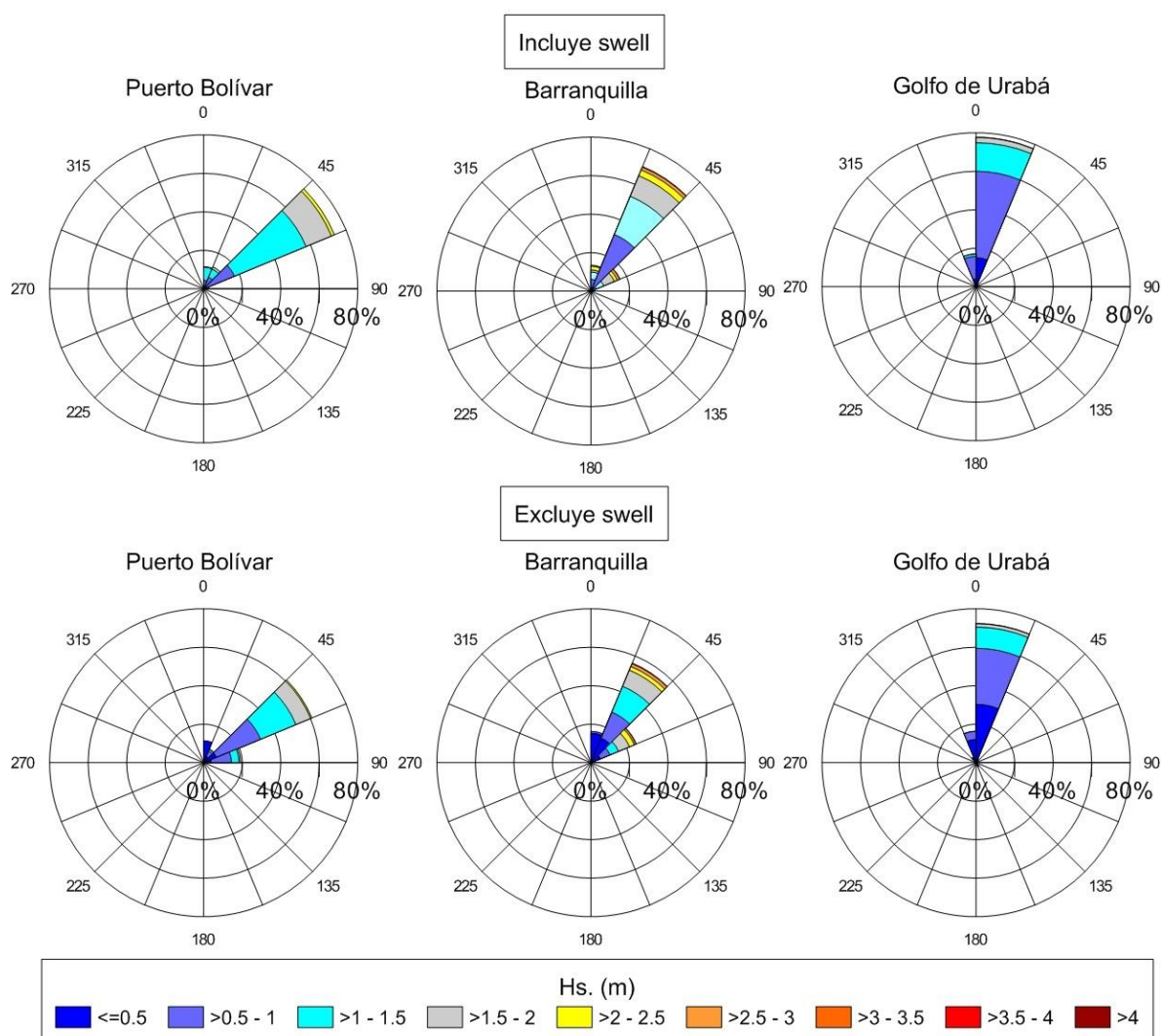


Figura 8.6 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell en la época húmeda.

En los resultados de las simulaciones de la época de lluvias, las alturas significativas fueron menores que las de la época seca debido a la disminución de las velocidades de los vientos alisios durante este periodo de tiempo, producto del desplazamiento de la ZCIT hacia el sur.

En la figura anterior se observaron direcciones diferentes entre las simulaciones con swell y sin swell para los puntos de control en Puerto Bolívar y Barranquilla, aunque las direcciones del oleaje siguen siendo las mismas.

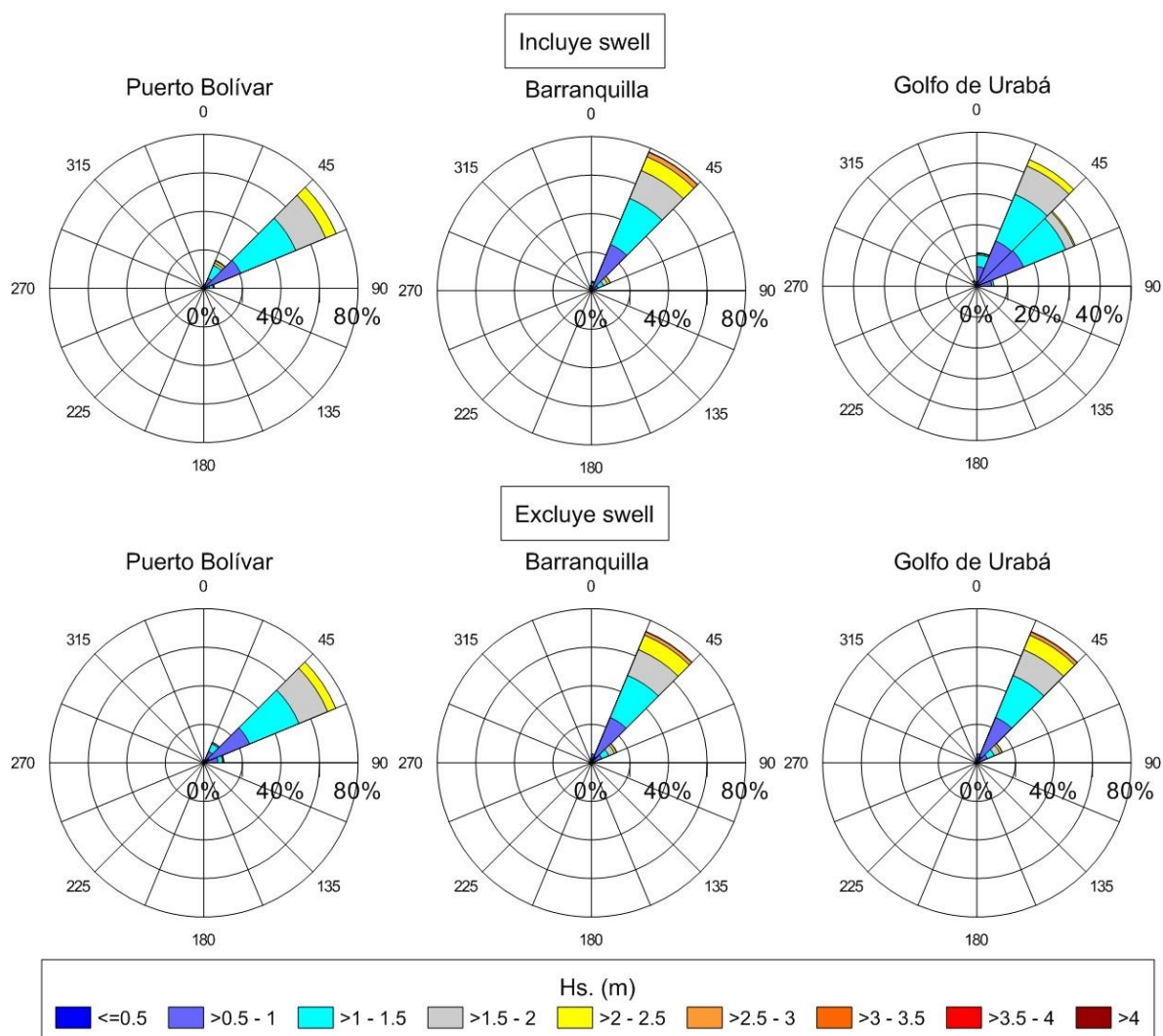


Figura 8.7 Hs. en el Caribe colombiano calculadas con y sin swell durante los huracanes Dean y Félix.

Con base en lo anterior se concluye que el oleaje en el litoral Caribe colombiano es influenciado por el swell. La influencia se da durante todo el año y es más evidente durante el paso de los huracanes. Como una prueba más de la influencia del swell en el oleaje del Caribe colombiano, se presentan a continuación los resultados de las simulaciones y de las mediciones de las boyas de Barraquilla y Puerto Bolívar, entre diciembre del 2008 y enero de 2009, y un segundo periodo de octubre a noviembre de 2009,

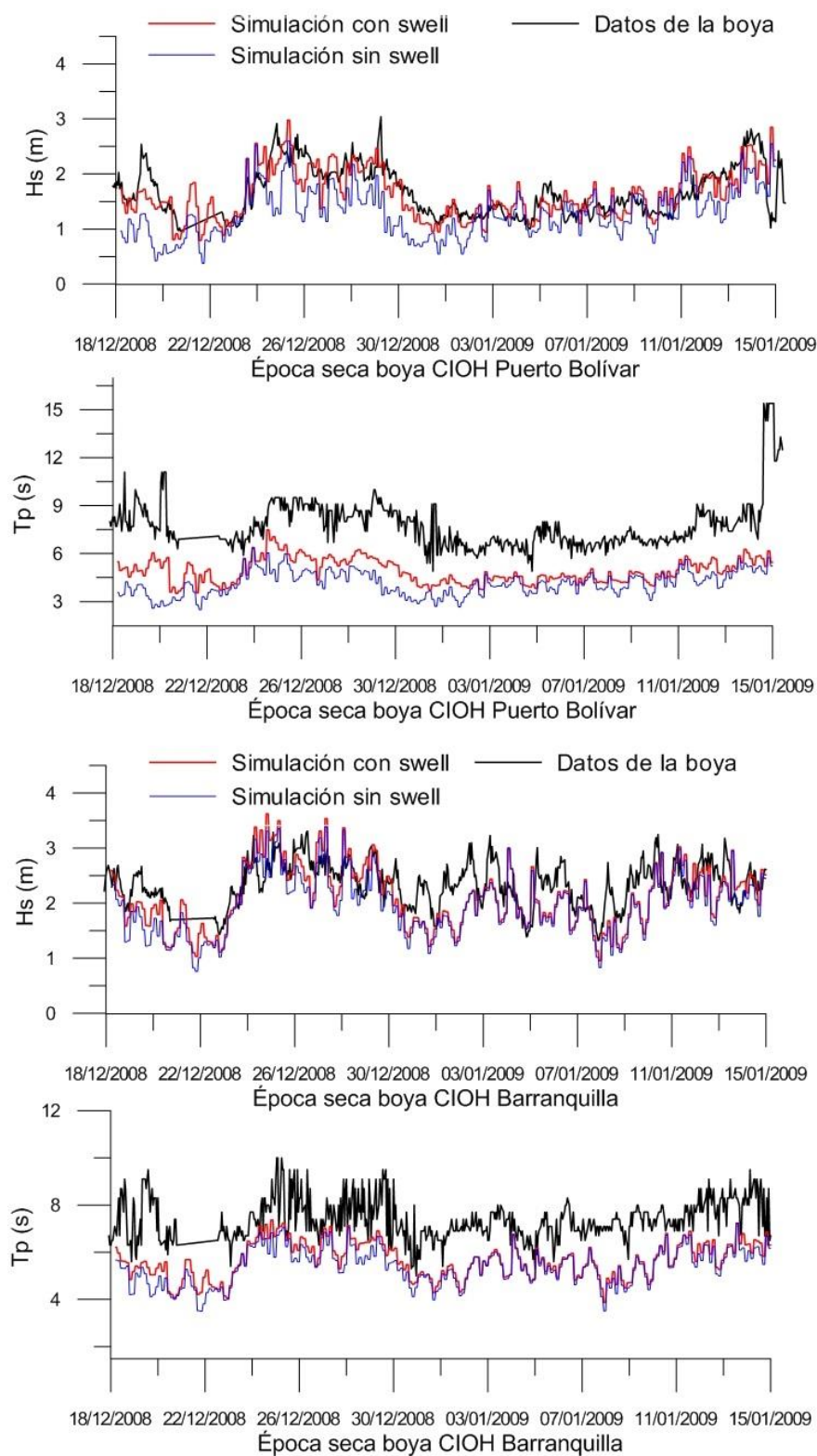


Figura 8.8 El oleaje medido y el simulado para la época seca con y sin el swell.

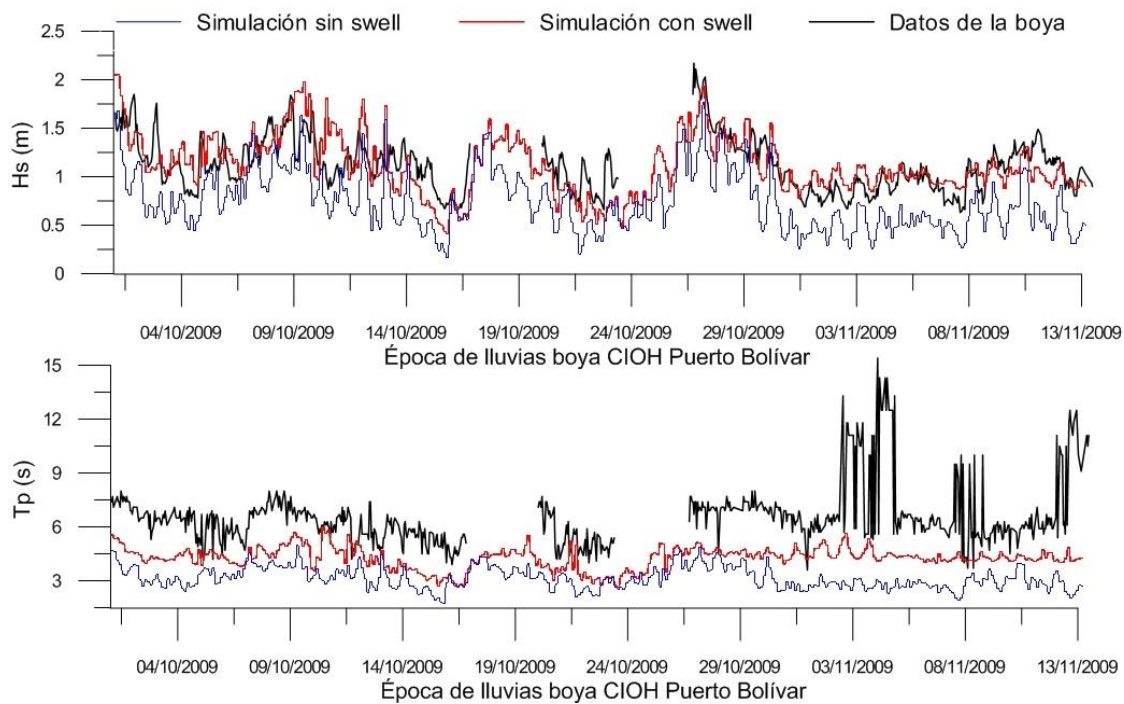


Figura 8.9 El oleaje medido y el simulado para la época de lluvias con y sin el swell.

En las figuras anteriores es claro cómo los resultados del modelo que incluyen el swell se ajustan mejor al oleaje, ya que tienen una media más alta y representan algunos picos que no se observan en la serie sin swell.

Con los resultados de las simulaciones fueron calculados el RMS y el MAE para las alturas significativas y periodos al pico. Los resultados de las simulaciones de la época seca fueron confrontados con las mediciones de las boyas de Barranquilla y Puerto Bolívar y los de la época de lluvias sólo con los datos de la boya de Puerto Bolívar (ver Tabla 8.14).

Tabla 8.14 Errores de las simulaciones incluyendo el swell y sin este.

Incluye el swell			Excluye el swell	
Barranquilla época seca				
Variable	RMS	MAE	RMS	MAE
Hs (m)	0,47	0,39	0,54	0,45
T (s)	1,93	1,72	2,22	1,98
Puerto Bolívar época seca				
Variable	RMS	MAE	RMS	MAE
Hs(m)	0,35	0,27	0,52	0,43
T (s)	3,09	2,80	7,38	6,96
Puerto Bolívar época de lluvias				
Variable	RMS	MAE	RMS	MAE
Hs(m)	0,38	0,28	0,47	0,41
T (s)	2,43	2,10	3,30	2,95

La tabla anterior permite ver cómo la falta del swell genera diferencias entre los resultados de las simulaciones y los datos medidos por las boyas, y vuelve los resultados del modelo casi inadmisibles. Ya que los altos RMS se deben a las diferencias entre las medias de las series, al simular el oleaje en el litoral Caribe colombiano sin esta información sería incorrecto, es una prueba clara de que el oleaje en todo el Caribe colombiano es significativamente influenciado por el oleaje externo y los fenómenos climatológicos externos.

Se anota que en la cuantificación de los errores no se evaluó el paso de huracanes en el océano Atlántico porque, aunque es notoria la diferencia en el oleaje calculado entre los dos modelos utilizados con y sin swell, la falta de información en las boyas durante el periodo de huracanes no permite evaluar el desempeño de los modelos en estas condiciones. Por lo tanto, se presume que, al igual que en el periodo de calma, el modelo que incluye el swell se ajusta mejor a la realidad (POSADA JARAMILLO, FEDERICO et al., 2010).

8.2 INTERACCIÓN DEL OLAJE Y LAS CORRIENTES EN EL CARIBE

El oleaje y las corrientes dentro del área de estudio interactúan con los fenómenos fuera y dentro de ella. Con el fin de conocer los efectos que tienen las corrientes en el oleaje y viceversa, en este trabajo se realizó una serie de pruebas con el modelo tridimensional del Caribe con condiciones de borde del oleaje variable a lo largo de las fronteras permeables (ver Figura 4.1), construidas con base en la información de las boyas del *National Data Buoy Center* (NDBC) y del modelo *Wave Watch III* (WWIII).

Este modelo en tres dimensiones permitió realizar varios experimentos, en los cuales se simularon por separado el oleaje y las corrientes y se compararon estos resultados con respecto a los obtenidos de una modelación con todas las variables o modelo patrón. Este procedimiento se hizo para la época seca del 2009 y para la época de lluvias del 2010, haciendo uso de la Diferencia Absoluta Promediada en el Tiempo o DAPT, calculada para cada una de las celdas del modelo.

$$DAPT = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N ABS(X_{(N)sinacoplar} - X_{(N)acoplado}) \quad (8.4)$$

donde:

N: Número de intervalos de tiempo.

$X_{sinacoplar}$: Valor de la variable proveniente de un modelo sin acoplar (velocidades, niveles de mareas, alturas significativas o direcciones).

$X_{acoplado}$: Valor de la variable proveniente de un modelo acoplado (velocidades, niveles de mareas, alturas significativas o direcciones).

Se puede decir que esta ecuación es un MAE modificado, donde no se compara la simulación con resultados de mediciones sino con respecto a la modelación patrón, y permite caracterizar las zonas dentro del modelo con diferencias importantes debidas a la interacción entre las olas, las corrientes y las mareas.

Los DAPT de las alturas significativas del oleaje y de las velocidades superficiales son mayores en las celdas cercanas a la costa colombiana y en la zona entre el archipiélago de San Andrés y Centroamérica, lo cual denota una clara interacción entre el oleaje y las corrientes en los resultados del modelo acoplado (ver Figura 8.10). Estas interacciones entre las olas y las corrientes son bastante notorias en los resultados de las pruebas F realizadas a las series de datos.

En las series de las alturas significativas, se ve como en las zonas cercanas a la Sierra Nevada de Santa Marta y cerca de Centroamérica las varianzas no son estadísticamente iguales. Igualmente, las varianzas de las velocidades superficiales difieren entre el modelo solo de corrientes y el modelo acoplado.

En cuanto a los niveles de las mareas sólo se encontraron DAPT altos en el golfo de Maracaibo donde, debido a la poca profundidad, la fuerte interacción entre el oleaje que trata de entrar al golfo y las corrientes genera cambios en los niveles de las mareas en este cuerpo semi - cerrado de agua.

La distribución espacial de las diferencias o DAPT para las diferentes variables (Hs, niveles de marea y velocidades superficiales), durante las épocas seca y de lluvias del 2009, sigue una trayectoria similar a la de la corriente del Caribe en la mayor parte del área de estudio, como se presenta en la siguiente figura:

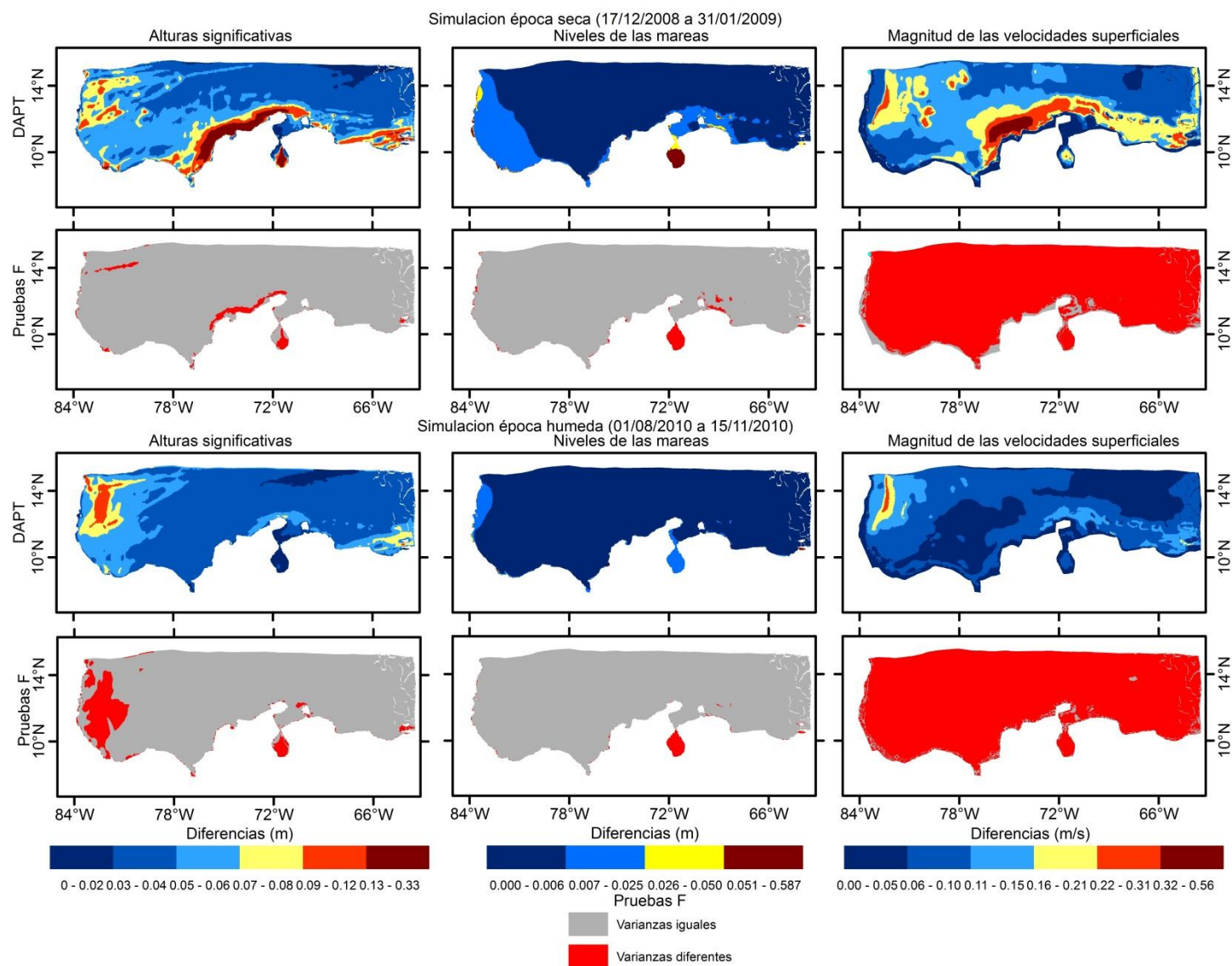


Figura 8.10 La interacción ola – corrientes y sus efectos en el oleaje, las mareas y las corrientes superficiales.

En esta figura se aclara la influencia de las corrientes superficiales en el oleaje y viceversa, aunque no se establece cuál es el papel que juega el ángulo entre el oleaje y las direcciones de las corrientes (diferencias direccionales). Este ángulo es importante ya que tiene que ver con la forma como se suman las componentes de las fuerzas generadas por estos fenómenos, y con la relación de los anteriores con la profundidad del agua. En la Figura 8.11 se pueden ver las relaciones entre las diferencias de los modelos, para las alturas significativas y de las velocidades de las corrientes, los ángulos entre el oleaje y las corrientes, y la relación de las anteriores con las profundidades.

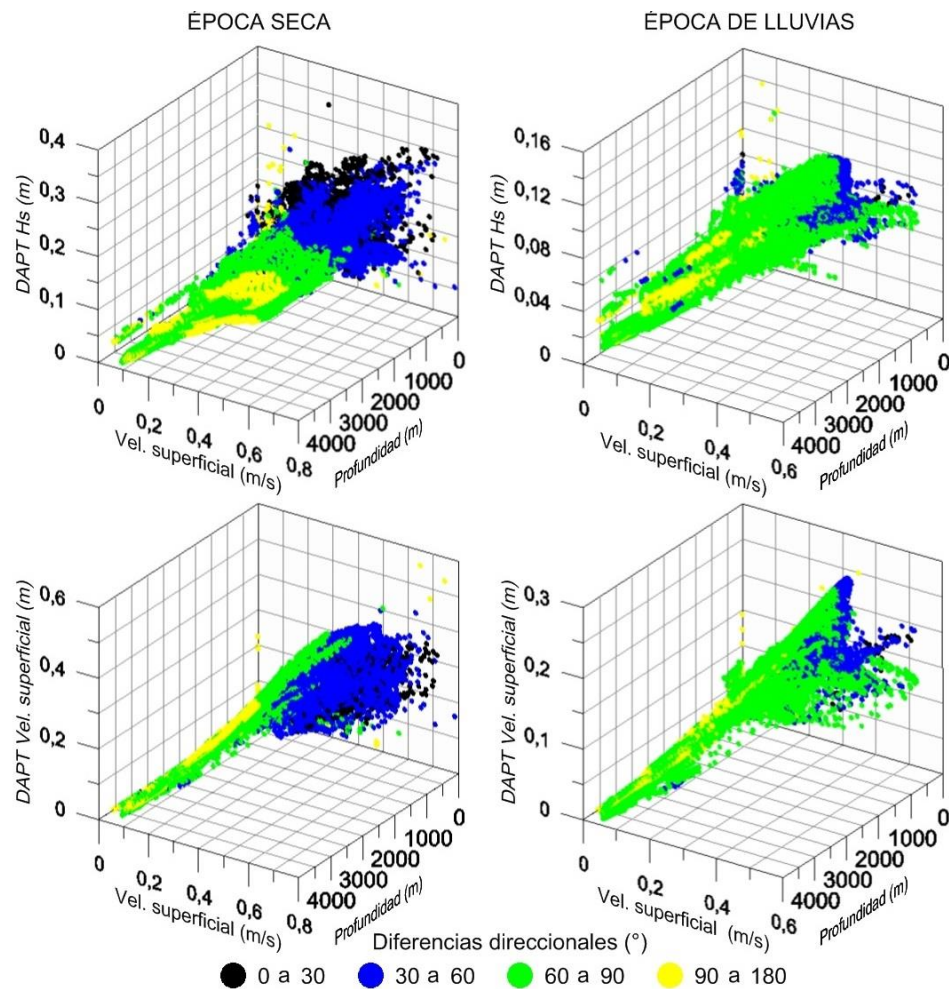


Figura 8.11 Interacción de las alturas significativas, las velocidades superficiales, y las profundidades en las épocas secas y húmedas.

Con base en los resultados anteriores se concluye que la interacción ola - corriente tiene efectos en las alturas significativas de las olas en las zonas con profundidades entre 0 y 1000 m y, durante la época seca, hasta los 3000 m; en estas zonas también confluyen velocidades superficiales altas y diferencias entre la dirección del oleaje y de las corrientes superficiales entre 0° y 60°.

Las corrientes se ven afectadas en todo el dominio y se pueden ver cambios en los niveles de mareas debidos a la interacción entre estas variables en zonas de aguas someras.

La mayoría de los DAPT más altos se ubican en el recorrido de la corriente del Caribe. Las zonas con mayor interacción entre el oleaje y las corrientes se ubican entre la Guajira y Barranquilla en Colombia. En estas zonas es donde se presentan las mayores diferencias entre el modelo acoplado y los no acoplados, también en esta zona se combinan la corriente del Caribe con las bajas profundidades (0 a 1000 m) y los fuertes vientos. La segunda zona con mayor interacción se ubica cerca de las costas hondureñas donde los vientos alisios mueven el agua y combinan sus efectos con la baja profundidad del mar y el paso de la corriente del Caribe.

8.3 AUMENTOS EN LAS ALTURAS DE LAS MAREAS Y EL OLEAJE POR EL PASO DEL HURACÁN JOAN, SIMULADOS CON LAS VELOCIDADES Y PRESIONES ATMOSFÉRICAS EN EL OJO DEL HURACÁN OBTENIDAS DEL NHC

En el mar Caribe y en el golfo de México, todos los años entre finales de mayo y noviembre se da la temporada de huracanes. Estos nacen al oeste de África y se desplazan hacia el noroeste, afectando las Antillas menores y mayores, el norte de Suramérica, Centroamérica y las costas del golfo de México y Norteamérica (CIOH, 2007).

Los huracanes pueden ser catastróficos para las actividades marítimas y la infraestructura costera de un país y ponen en riesgo las vidas de los habitantes, por lo que es necesario conocer sus efectos en el oleaje, las mareas y las corrientes mientras transitan por el Caribe. A modo de experimento, se simuló el huracán Joan, el cual fue elegido por que a su paso generó grandes oleajes y daños en el Caribe colombiano. Esta prueba se realizó con el fin de tener una idea de los aumentos en las alturas significativas del oleaje en esta región durante la tormenta.

Este huracán transitó por el mar Caribe en octubre de 1988 y pasó el 17 de octubre cerca de la península de La Guajira. Luego alcanzó la categoría 4 en la escala Saffir Simpson el 22 de octubre cerca a la costa nicaragüense (Figura 8.12), provocando pérdidas materiales importantes en el archipiélago de San Andrés y Providencia.

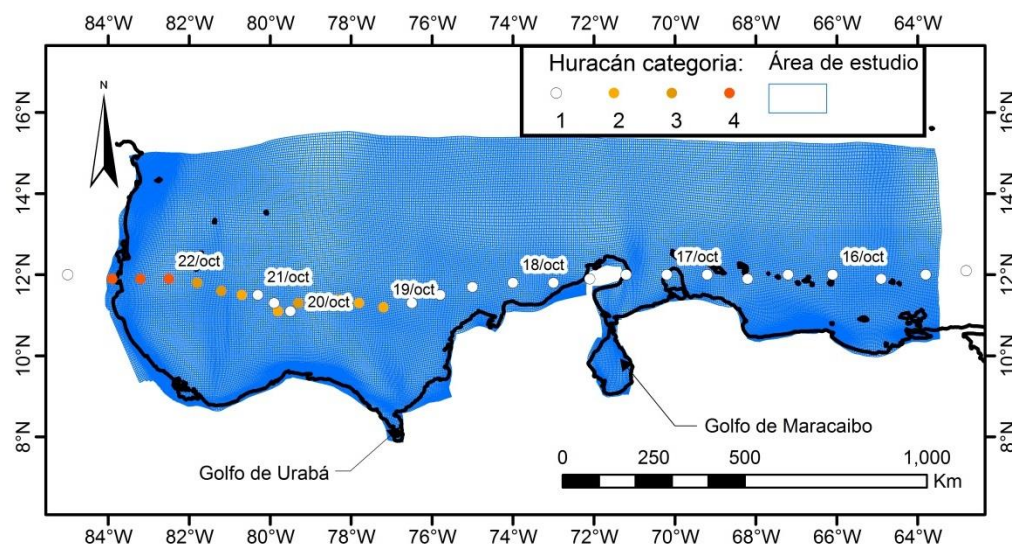


Figura 8.12 Trayectoria del huracán Joan (10 al 23 de octubre de 1988), modificada del Centro Nacional de Huracanes de la NOAA.

En esta prueba se construyeron dos mallas de vientos y presiones atmosféricas. La primera utilizando los datos del NARR y la segunda los datos anteriores en conjunto con los de las mediciones del *National Hurricane Center* (NHC), para incluir las velocidades reales y las presiones atmosféricas en el ojo del huracán. Lo anterior se realizó porque el NARR no tiene en cuenta vientos con velocidades superiores a los 50 km/h y con el fin de conocer las implicaciones de esta condición.

Los resultados de las simulaciones con estas mallas fueron corroborados con la información del oleaje visual de la base de datos ICOADS. Para esto, las alturas del oleaje visual se corrigieron usando la ecuación empírica del programa del Clima Marítimo Español (ESPAÑA, DIRECCIÓN GENERAL DE PUERTOS Y COSTAS. PROGRAMA DE CLIMA MARÍTIMO. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES, 1991), utilizada para el Caribe y el Pacífico colombiano en las publicaciones de TEJADA VÉLEZ, CARLOS ENRIQUE (2003) y RESTREPO L., JUAN CAMILO et al. (2009).

$$H_s = 0,54 + 0,59H_v$$

Los datos del ICOADS permitieron conocer el oleaje visual reportado por los barcos más cercanos al ojo de la tormenta. Sin embargo, no se contó con mediciones que permitieran corroborar los ascensos en los niveles del mar debidos a las bajas presiones en el ojo del huracán, por lo que estos resultados solo fueron advertidos y descritos en este análisis.

El 17 de octubre de 1988, el huracán Joan pasó sobre la península de la Guajira, y llegó el 20 de octubre al frente de la costa Caribe colombiana; para este día a las 6 horas (GMT), la simulación del oleaje presento alturas significativas máximas hasta de 3,5 m cerca de las ciudades de Cartagena y Barranquilla. A modo de comprobación se calcularon las alturas significativas con el oleaje observado del ICOADS, aplicando la ecuación (8.1), con la cual se obtuvieron alturas significativas hasta los 3,5 m, lo cual coincide con los resultados del modelo de oleaje. El 21 de octubre, Joan pasó por el archipiélago de San Andrés y Providencia, con vientos cercanos a los 200 km/h. para este día el modelo encontró alturas significativas del oleaje de hasta 4 m, coherentes con el oleaje encontrado con el ICOADS (Figura 8.16).

Aunque los resultados del modelo cerca del ojo del huracán son coherentes con la información suministrada por los pocos barcos en la zona, no son del todo correctos, ya que el NARR no tiene entre su información las velocidades del viento en el ojo de la tormenta. Adicionalmente, esta base de datos sólo tiene vientos de hasta 50 km/h, y este fenómeno tuvo vientos de 222 km/h, por lo que utilizando la información de la NHC (National Hurricane Center) se alimentó el modelo del Caribe con la información del ojo del huracán (Figura 8.13).

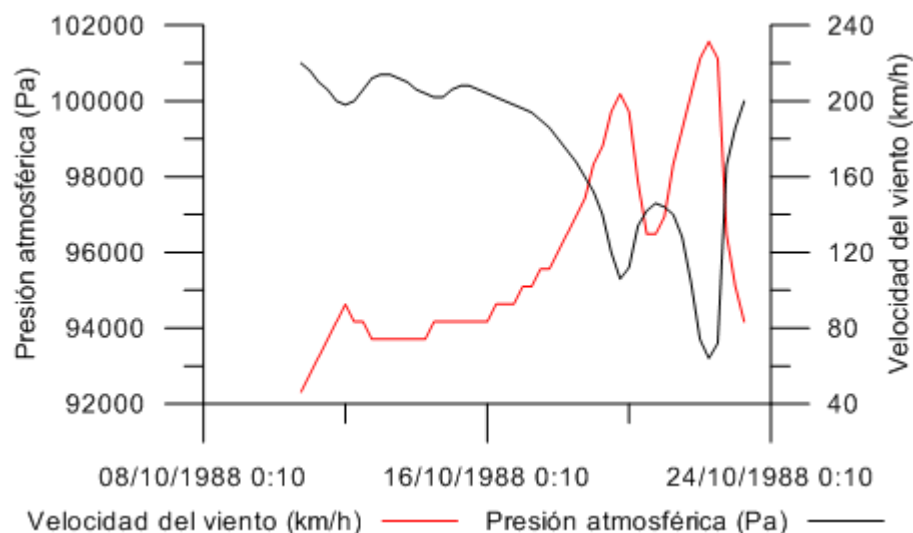


Figura 8.13 Presiones atmosféricas y velocidades en el ojo del huracán Joan (NHC).

La entrada de las velocidades y de las presiones atmosféricas reales del ojo del huracán en el modelo del mar Caribe produjo alturas significativas del oleaje de hasta 5 m en la zona del ojo y aumentos en las alturas significativas del modelo entre 0,25 m y 0,50 m.

A continuación, se presentan los resultados de las dos simulaciones del paso de este huracán durante los días en que presentó mayores alturas de oleaje reportadas en las costas continentales colombianas y de las islas de San Andrés y Providencia:

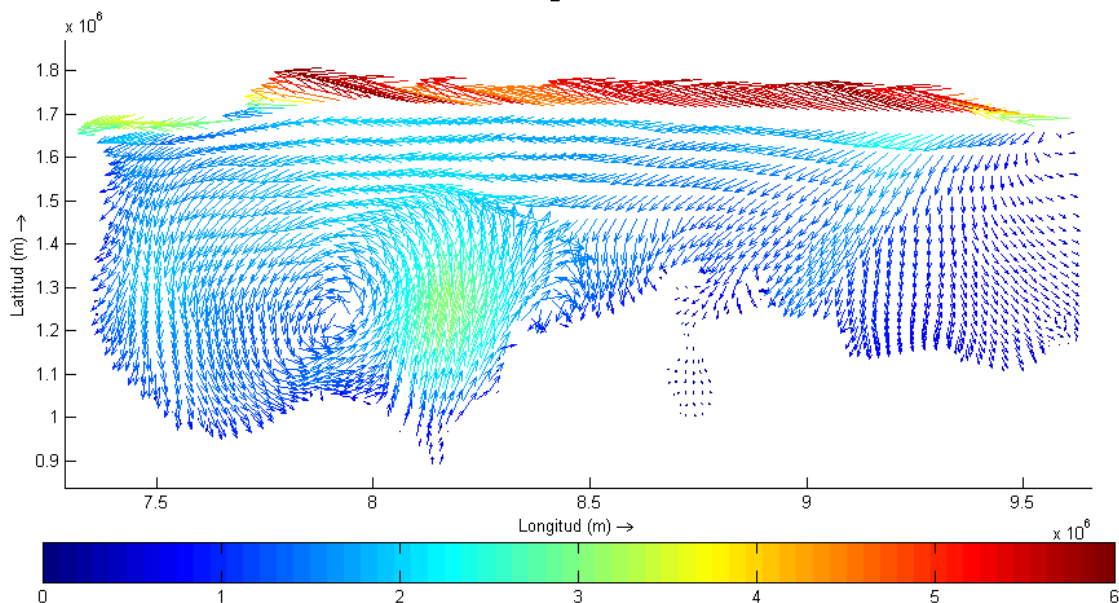


Figura 8.14 Hs. calculadas solo con el NARR durante el huracán Joan el 20 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator)

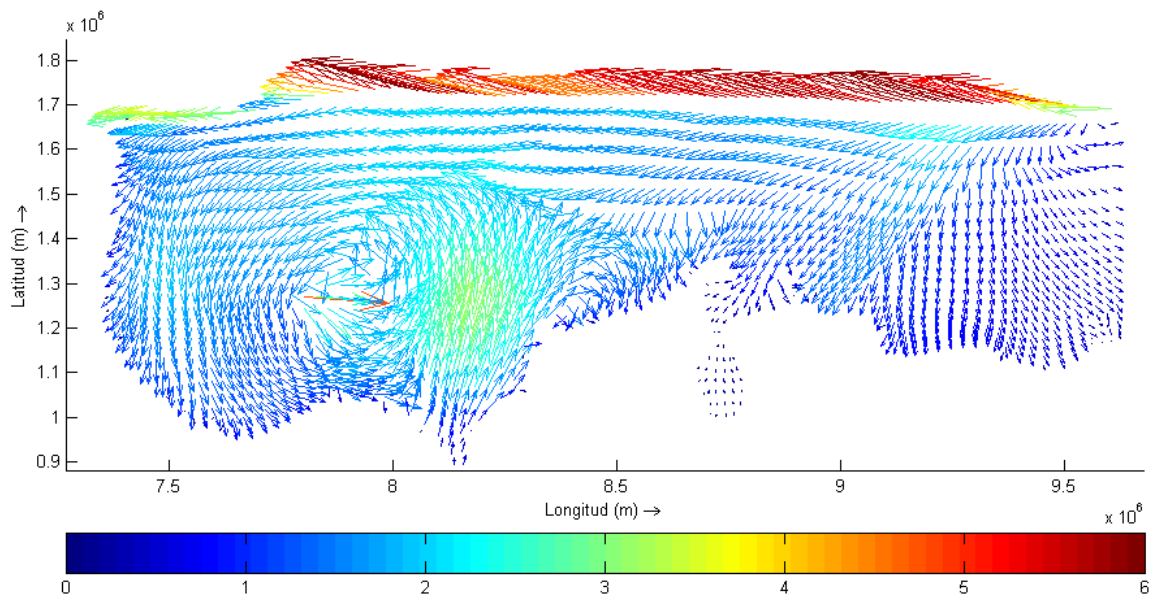


Figura 8.15 Hs. calculadas con el NARR y con el viento del ojo, durante el huracán Joan el 20 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).

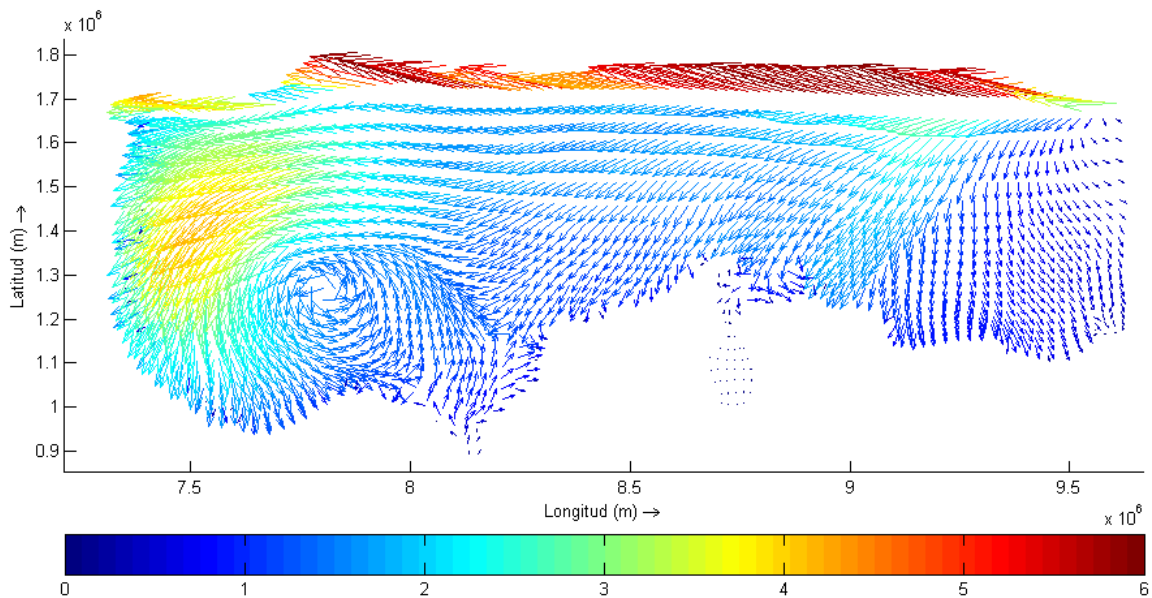


Figura 8.16 Hs. calculadas solo con el NARR, durante el huracán Joan el 21 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).

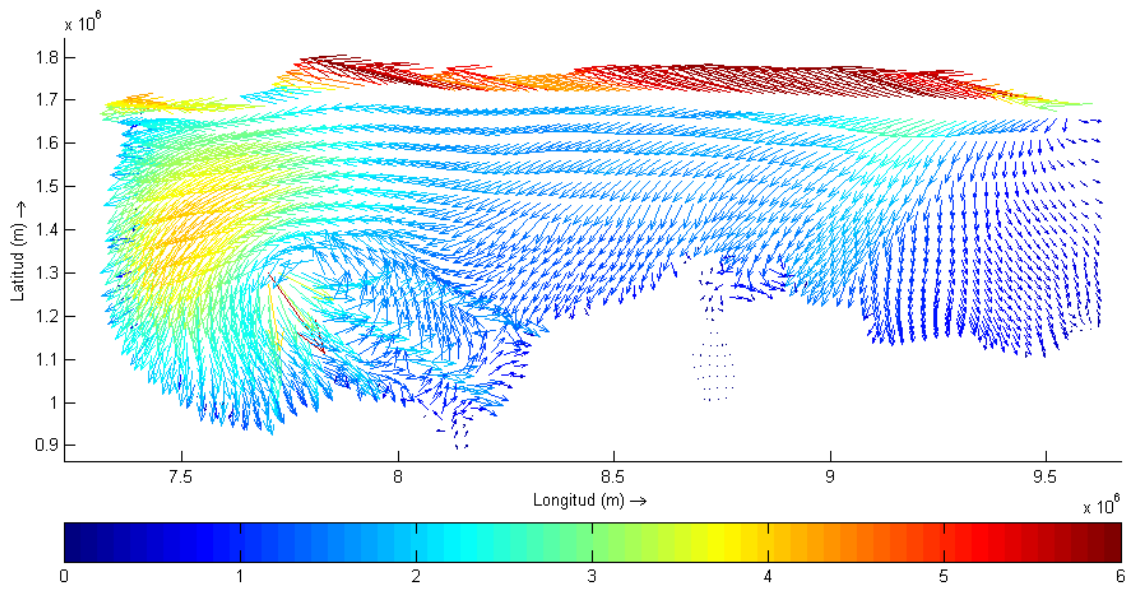


Figura 8.17 Hs. calculadas con el NARR y con el viento del ojo, durante el huracán Joan el 21 de octubre a las 6 horas (horario 0 horas GMT con la proyección WGS 1984 PDC Mercator).

Al comparar los dos modelos sin los datos de vientos y presiones en el ojo, y con ellos, se encontró que se generaron aumentos en las alturas significativas en la zona del ojo y hasta de 0,50 m en las alturas significativas bajo la zona de la cobertura nubosa (espiral de nubes al exterior del ojo).

Sin embargo, en los momentos en los que el huracán estuvo cerca del continente, entre el 17 y el 20 de octubre de 1988, se observaron diferencias entre las alturas significativas de las dos simulaciones en el golfo de Urabá, Cartagena, Barranquilla y Riohacha de 0,73 m, 0,33 m, 0,63 m y 1,06 m, respectivamente. En la zona del archipiélago de San Andrés y Providencia las diferencias fueron más evidentes, hasta de 1,34 m de altura, lo cual comprueba la importancia de la información del ojo en la modelación de huracanes.

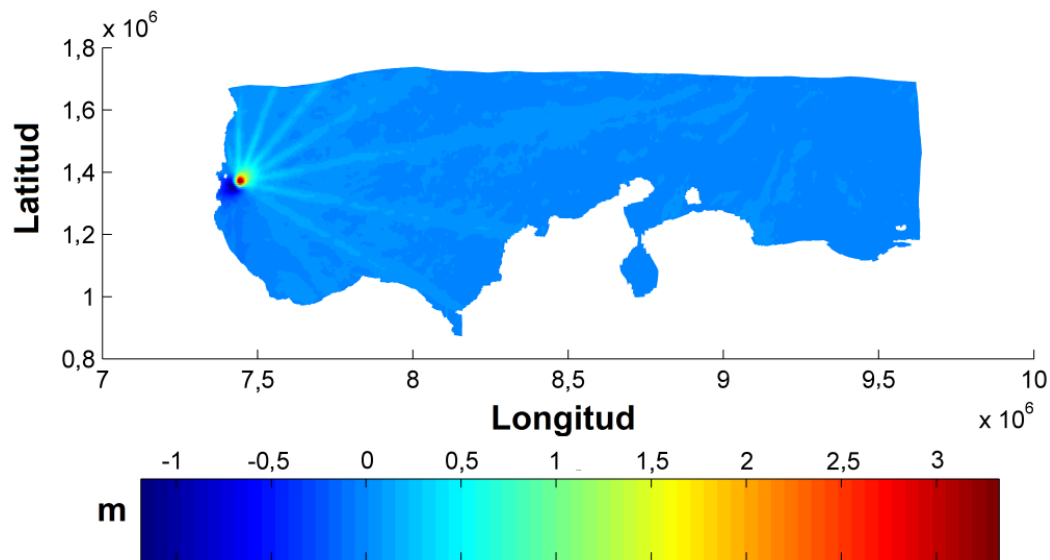


Figura 8.18 Diferencias entre las Hs de las dos simulaciones del huracán Joan el 22 de octubre 3:00 am.

La figura anterior muestra las diferencias entre las alturas significativas debidas a la inclusión de los vientos en el ojo del huracán el 22 de octubre y el modelo sin estos; los vientos produjeron cambios en el oleaje en gran parte del Caribe occidental y generaron aumentos en las alturas significativas en los litorales Caribe colombiano y centro americano.

La baja presión del ojo del huracán en el litoral Caribe colombiano produjo diferencias máximas entre las dos simulaciones cercanas a los dos centímetros en el nivel del mar; sin embargo, en la zona del ojo hubo diferencias hasta de 0,80 m, con niveles de marea de 2,5 m el 22 de octubre de 1988, y una presión barométrica de 932 hPa.

Lo anterior evidencia la necesidad de realizar más pruebas a la simulación de huracanes con este modelo, pero esto no descalifica los resultados, ya que fueron confirmados por la información de los barcos comerciales en el área de interés. En esta información fue claro el aumento de la altura del oleaje en la región debido a la tormenta y también cómo estas tormentas modifican las condiciones del oleaje y las mareas en la zona.

Se aclara que los barcos generalmente esquivan la trayectoria de los huracanes, por lo que las observaciones y, por ende, las comparaciones son válidas para las zonas cercanas a la

tormenta, mas no dan información del oleaje en el ojo. Por lo tanto, se concluye que para la correcta simulación de los ciclones tropicales es necesario contar con las mediciones de las velocidades de los vientos y de la presión del ojo del huracán en la superficie del agua. En futuros trabajos, para poder determinar la confiabilidad del modelo para simular este tipo de fenómenos, se deberán realizar comparaciones con respecto a huracanes mejor monitoreados con boyas de oleaje y mareógrafos. Se deberá utilizar un modelo atmosférico más preciso de este fenómeno que ofrezca mayor precisión para el campo de velocidades de los vientos y de las presiones atmosféricas en la zona nubosa del huracán, mejorando los resultados sobre las direcciones y las alturas de oleajes y mareas. También es recomendable analizar combinaciones de coeficientes de dragado que tengan en cuenta las condiciones de transferencia de energía entre el viento y el agua bajo condiciones de huracanes.

8.4 EL OLEAJE GENERADO POR EL PASO DE LOS FRENTE FRÍOS EN EL 2009.

La capacidad del modelo del mar Caribe para simular las condiciones de oleaje generadas por los frentes fríos en la costa Caribe colombiana y el archipiélago de San Andrés y Providencia fue determinada comparando las alturas significativas máximas para el periodo de duración de cada uno de los frentes fríos del año 2009 con respecto a los valores reportados en los informes mensuales del CIOH (CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS, 2009 a, 2009 b, 2009 c, 2009 d, 2009 e, 2009 f, 2009 g, 2009 h, 2009 i, 2009 j, 2009 k, 2009 l).

Durante el año 2009 se presentaron frentes fríos en los meses de enero a abril, y entre noviembre y diciembre. Estos frentes generaron aumentos en las alturas significativas en diferentes lugares del litoral Caribe colombiano y el archipiélago de San Andrés y Providencia.

Tabla 8.15 Frentes fríos del año 2009

Evento	Lugar del evento
Frente frío 8 y 9 de enero	Noreste del mar Caribe
Frente frío 14, 15, 16 y 17 de enero	San Andrés Y Providencia
Frente frío 20 de enero	Noroeste del mar Caribe
Frente frío 21, 22 y 23 de enero	San Andrés y Providencia y el litoral Caribe colombiano
Frente frío 1 y 2 de febrero	San Andrés y Providencia, litoral Caribe colombiano y Noroeste del Caribe
Frente frío 3, 4 y 5 de febrero	Noreste del mar Caribe
Frente frío 5, 6, 7 y 8 de febrero	San Andrés y Providencia, litoral Caribe colombiano, noreste del Mar Caribe
Frente frío 16, 17 y 18 de febrero	Norte del mar Caribe, Antillas mayores y menores
Frente frío 23, 24 y 25 de febrero	Mar Caribe centro y litoral Caribe colombiano.
Frente frío 1,2,3,4 y 5 de marzo	Islas de San Andrés y Providencia
Frente frío 5, 6, 7, 8, 9 y 10 de marzo	Islas de San Andrés y Providencia
Frente frío 7, 8 y 9 de abril	Noroeste del mar Caribe
Frente frío 11, 12, 13 y 14 de noviembre	Noroeste del Mar Caribe
Frente frío 25, 26, 27 y 29 de noviembre	Noroeste del Mar Caribe
Frente frío 4 al 7 de diciembre	Noroeste del mar Caribe-este de la Península de Yucatán y oeste de Cuba
Frente frío 18 al 22 de diciembre	Noroeste del mar Caribe
Frente frío 26 al 27 de diciembre	Este de la Península de Yucatán y oeste de Cuba

En esta evaluación se clasificaron las alturas significativas simuladas que superaban la media más la desviación estándar de cada uno de los meses durante los cuales se presentaron los frentes fríos. En la Figura 8.19 se presentan con círculos de contornos negros los valores simulados que no superan la media más la desviación estándar de altura significativa (Hs) mensual; los círculos rojos representan aquellos valores máximos que sí superan estos límites. Los rombos negros representan los valores reportados en los informes mensuales del CIOH.

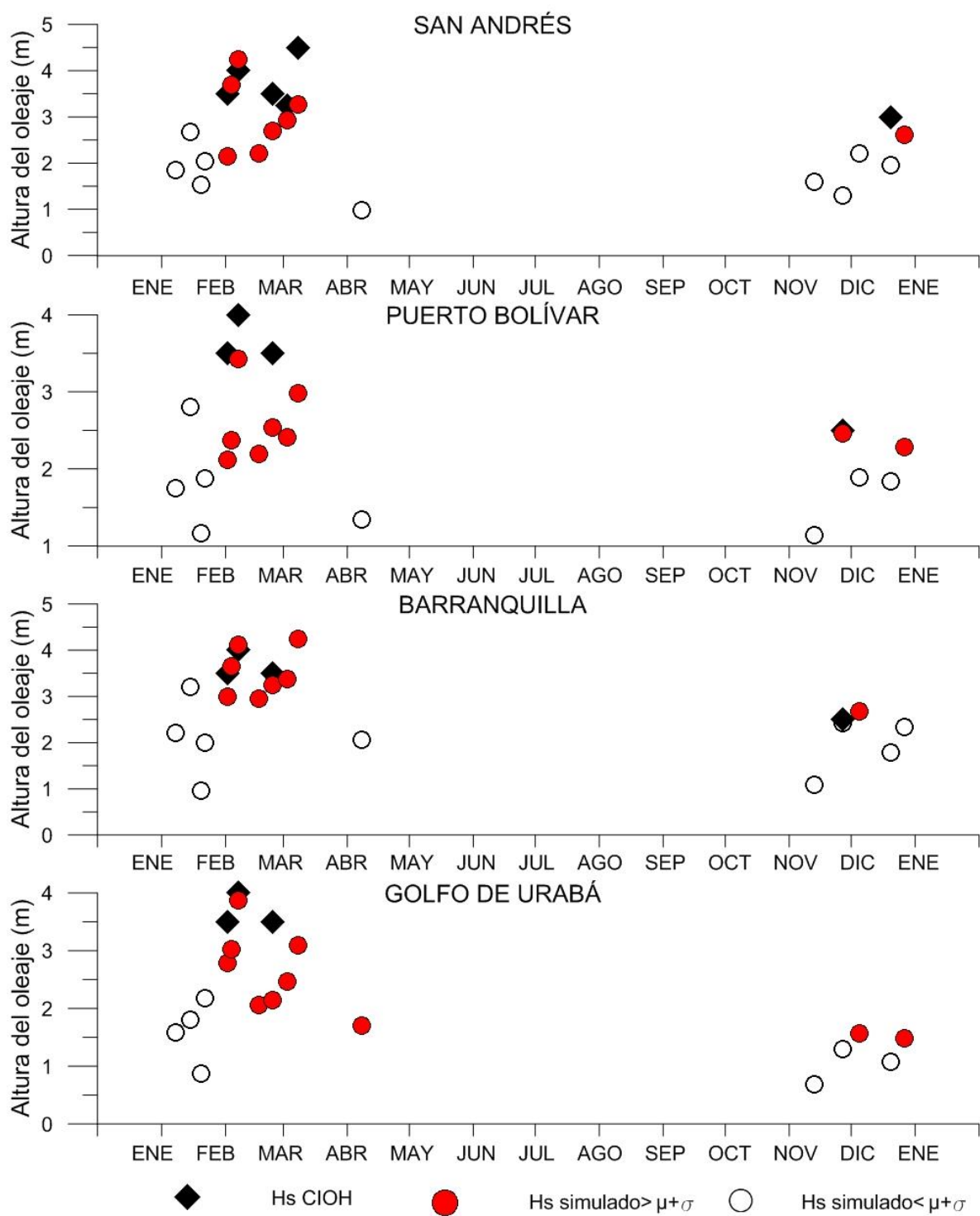


Figura 8.19 Alturas de oleaje máximas durante el paso de los frentes fríos del 2009.

En las siguientes viñetas se describe el comportamiento de los frentes fríos durante el 2009, y las comparaciones realizadas con la información publicada por el CIOH:

- En la Figura 8.19 se muestra que los primeros cuatro frentes fríos no generaron elevaciones significativas según reportó el CIOH, y fue confirmado por el modelo, ya que no se observaron elevaciones más arriba de la media más la desviación estándar de las alturas significativas del oleaje simulado de este mes.
- En el primer frente frío del mes de febrero no se alcanzaron los valores de oleaje máximos reportados para el litoral Caribe colombiano y el archipiélago de San Andrés y Providencia. En mar abierto, cerca de las costas colombianas, si se obtuvieron alturas significativas simuladas hasta de 3,5 m.
- En los últimos cuatro frentes fríos del mes de febrero y en los dos de marzo, hubo alturas de oleaje simuladas muy cercanas a los valores máximos descritos por el CIOH en los puntos de control como Barranquilla y San Andrés y, en el golfo de Urabá. Con el modelo se encontraron alturas significativas altas debidas al oleaje que viajó desde las zonas por donde pasaron estos fenómenos.
- Durante el segundo y tercer frente frío del mes de febrero no se reportaron alturas de oleaje fuera de lo normal; sin embargo, el modelo obtuvo resultados con valores superiores a los límites para el mes de febrero de 2009.
- En el mes de abril, se presentó un solo frente frío que no generó un aumento de la altura del oleaje. Este hecho fue confirmado por la simulación, aunque en el golfo de Urabá, debido a que el frente influyó en esta área, se produjeron oleajes simulados superiores a la media más la desviación estándar.
- Durante los meses de noviembre los valores simulados y los reportados por el CIOH, fueron bastante cercanos en los puntos de control de Puerto Bolívar y Barranquilla; en el modelo en mar abierto se observaron valores iguales a los reportados por el CIOH.

Aunque esta es una primera mirada cualitativa a esta aplicación, no se obtuvieron resultados con grandes diferencias. Se deberán realizar comparaciones con series de oleaje reales, en diferentes puntos de control en el mar Caribe, para poder cuantificar la precisión del modelo al simular estos eventos.

9. CONCLUSIONES

El modelo Delft Caribe, fue desarrollado con el fin de caracterizar el oleaje y las mareas del Mar Caribe de forma acoplada llevando las condiciones desde las zonas alejadas, hasta zonas someras. A continuación se presentan las conclusiones que se obtuvieron y sus aportes al conocimiento, y por último las limitaciones del modelo y los trabajos futuros que se pueden llevar a cabo con el modelo.

Los resultados de las diferentes simulaciones del año 2009, realizadas en la etapa de validación del modelo Delft Caribe, permitieron caracterizar el patrón de oleaje en el mar Caribe. Este proviene del oriente siguiendo los vientos alisios (nororiente – suroccidente), y gira hacia el sur en la península de La Guajira hasta llegar a las costas panameñas y colombianas.

Las direcciones de propagación del oleaje se ven influenciadas por la disminución de las velocidades de los vientos durante la época húmeda. Esta circunstancia permite que algunos vientos del sur disminuyan las alturas significativas del oleaje en la costa Caribe colombiana, especialmente en el golfo de Urabá.

En la zona del archipiélago de San Andrés, la dirección del oleaje fue coincidente durante todo el año 2009 con las direcciones de los vientos alisios; en esta zona, las alturas significativas medias fueron más altas que las que se presentaron en el litoral Caribe colombiano durante la época de lluvias (1,5 m en San Andrés y 0,6 m en promedio), probablemente por el paso constante de tormentas.

El oleaje, luego de pasar por la zona de San Andrés y Providencia, llega al noroccidente del área de estudio donde entra en la plataforma centro americana (costas de Honduras y Nicaragua) y disminuye su altura, por la afectación del fondo en el oleaje.

En este trabajo, se encontró que en el golfo de Urabá (sur del área de estudio) durante la época seca del año 2009 hubo alturas significativas cercanas a los 3 m y más bajas en la época de lluvias. Estos resultados se pueden ver de forma detallada en el Anexo C, donde se presentan las rosas de oleaje mes a mes del 2009.

Durante el año 2009, los resultados del modelo mostraron para el Caribe colombiano mareas semidiurnas mixtas con niveles de marea que oscilan entre 0,35 m y -0,25 m, coherentes con los rangos de mareas encontrados por RESTREPO, JUAN D. y LÓPEZ, SERGIO A. (2008) de 0,62 y 0,15 m . En este periodo de tiempo no se encontraron cambios importantes en las mareas debidos a los cambios del clima de las épocas seca y húmeda.

Las corrientes principales dentro del dominio del modelo son la corriente del Caribe y el Giro de Panamá – Colombia. Estas corrientes en las simulaciones, presentaron velocidades máximas de 1 m/s y 0,3 m/s respectivamente (ver Figura 7.10 y Figura 7.11).

Fuera de las dos corrientes anteriores, a lo largo de la costa Caribe colombiana se genera el patrón de corriente de deriva que viaja hacia el sur por la costa Caribe Colombiana. El cual parte de la sierra nevada de Santa Marta; zona donde interactúan múltiples factores como el viento, el oleaje y las corrientes superficiales. Estas interactúan y afectan tanto al oleaje como las corrientes.

En toda el área de estudio interactúan el oleaje y las corrientes, hecho que modifica las alturas significativas del oleaje en las zonas poco profundas (entre 0 y 1000 m) y durante las épocas secas hasta las zonas con profundidades de 3000 m.

La interacción con el oleaje modifica las corrientes superficiales en toda el área de estudio, mientras que los cambios en los niveles solo se ven afectados por esta interacción en las costas y el golfo de Maracaibo.

La influencia que ejerce el oleaje en las corrientes superficiales y viceversa está ligada al ángulo con el que se cruzan. Este ángulo influencia la suma de los momentum generados por el oleaje y las corrientes.

En las diferentes modelaciones realizadas, se observó que las direcciones y las alturas significativas del oleaje y los niveles de las mareas en el Caribe también se ven afectados por los huracanes y frentes fríos, como se observó con la modelación del huracán Joan, donde la altura significativa tuvo hasta 6 m, y donde la disminución en la presión atmosférica produjo aumentos en los niveles del mar hasta de 0,80 m en el ojo del huracán.

Por último, se concluye que el modelo es útil para simular y caracterizar las condiciones oceanográficas medias y generadas durante el paso de tormentas en la zona de estudio, lo cual es importante en el análisis de riesgos en las zonas costeras, diseño de infraestructura y para la navegación. Y es capaz de transitar o trasladar las condiciones oceanográficas de las fronteras hacia las zonas someras.

Aunque se tengan los resultados de este modelo y la capacidad de calcular los patrones de corrientes superficiales, oleajes y mareas en cualquier zona del Caribe medio y sur, esto no elimina la necesidad de que los estados en la región monitoreen el océano y realicen mediciones del oleaje, las mareas y otros fenómenos oceanográficos.

Este es un modelo continental aun en desarrollo al que, aunque arrojó buenos resultados, todavía le quedan algunos aspectos sin resolver como:

- El swell, que es un forzador importante en el proceso de generación del oleaje y por ende es un parámetro de entrada relevante para la modelación de las variables oceanográficas y, aunque estas mediciones son difíciles de conseguir en todo el área de estudio, no tenerlas en cuenta genera imprecisiones en los resultados del modelo, por lo que concluye que es recomendable utilizar datos de otros modelos con el fin de contar con la información del swell, lo cual crea la necesidad de estudiar nuevas bases de datos de oleaje en las fronteras diferentes al WWIII, y evaluar su impacto en los resultados.
- Las bases de datos de los vientos y presiones atmosféricas cada vez son más precisas, se deben evaluar nuevas bases de datos. Que permitan mejorar los resultados; esta tarea se podría llevar a cabo complementando las bases de datos ya utilizadas con mediciones de estas variables en tierra.
- Los parámetros de entrada como los coeficientes de dragado, las rugosidades y los coeficientes de viscosidad deben ser calibrados constantemente en el futuro, afinando el modelo cada vez más, a la luz de nuevas mediciones oceanográficas, y con el fin de obtener resultados más precisos.

En general, en trabajos futuros se deberán realizar mediciones de los caudales de los afluentes, mareas, corrientes, oleajes y vientos con el fin de mejorar los datos de entrada del modelo y con estos calibrar aún más el modelo con el fin de mejorar la precisión.

Por último, se debe aclarar que este trabajo es una contribución inicial a la construcción de un modelo matemático de una zona muy amplia donde, en trabajos futuros, se debe evaluar la introducción de fenómenos termo – halinos y, posteriormente, se podrían caracterizar las grandes plumas de sedimentos y contaminantes provenientes de los afluentes y sus trayectorias, con el fin de conocer la influencia de las plumas y de otros fenómenos en las reservas de vida natural dentro del Caribe.

10. BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO RESTREPO, Pablo, RESTREPO ESTRADA, Andres F., MORALES, Ricardo, TEJADA VÉLEZ, Carlos E., TORRES, Ricardo y OSORIO ARIAS, Andres F. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. En: Boletín Científico CIOH No 23. 2005, p. 33-45, ISSN 0120-0542

ALDRIDGE, B. N y GARRET, J.M. Roughness coefficients for stream channels in Arizona. En: Reporte técnico de: US Geological Survey. 1973, p. 87,

ANDRADE, Carlos Alberto. Análisis de la velocidad del viento sobre el mar Caribe. En: Boletín Científico del CIOH. 1993, 13 p. 33-43,

ANDRADE, Carlos Alberto, MOOERS, Christopher N. K. y DESMOND BARTON, Eric. Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. En: Journal of Geophysical Research. 2003, Vol. 108

BLUMBERG, Alan F. y MELLOR, G.L. . A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Sci. edited by N. S. Heaps

AGU, Washington, D. C.: 1987. 1-16 p.

CARTON, James A. y Chao, Yi. Caribbean Sea eddies inferred from TOPEX/POSEIDON altimetry and a 1/6° Atlantic Ocean model simulation. En: Journal of Geophysical Research. 1999, VOL. 104 p. 7743–7752, DOI: 10.1029/1998JC900081

CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS. Boletín Científico. En: <http://www.cioh.org.co/>. Octubre 2007, No. 25, 54-60 p., ISSN 0120-0542

CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS. Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Enero 2009, No. 162 17 p.,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Febrero 2009, No. 163 15 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Marzo 2009, No. 164 15 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Abril 2009, No. 165 14 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Mayo 2009, No. 166 16 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Junio 2009, No. 167 17 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Julio 2009, No. 168 22 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Agosto 2009, No. 169 24 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Septiembre 2009, No. 170 25 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Octubre 2009, No. 171 24 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Noviembre 2009, No. 172 25 p. ,

----- Boletín Meteomarinero del Caribe Colombiano. En: <http://www.cioh.org.co/>. Diciembre 2009, No. 173 27 p. ,

CORREA ARANGO, Iván Darío, ALCÁNTARA-CARRIÓ, Javier y GONZÁLEZ, Diego A. Erosion along the Colombian Caribbean Coast. En: Journal of Coastal Research, (Proceedings of the 2nd Meeting in Marine Sciences). 2005, p. 52-57, ISSN 0749-0208

COWAN, W. L. . Estimating hydraulic roughness coefficients. En: Agricultural engineering. 1956, Vol. 37 No. 7 p. 473-475

CRANK, J.; NICOLSON, P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1947, Vol 43 (1). 50-67 pp. doi:10.1007/BF02127704.

DIAZ, H, FOLLANND, C., MANABE, T., PARKER, D., REYNOLDS, R. y Woodruff, S. . Workshop on advances in the use of historical marine climate data. En: WMO Bulletin 51. 2002, p. 377-380,

Dingemans, M. W., C., Radder A. y J., de Vriend H. Computation of the driving forces of wave-induced currents. En: Coastal Engineering. 1987, Vol. 11 p. 539-563,

EGBERT, Gary D. y EROFEEVA, Lana. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. En: Journal Atmospheric Oceanic Technologies. 2002, Vol. 19 pp. 183-204,

España, Dirección General de Puertos y Costas. Programa de Clima Marítimo. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Actividades del Programa de Clima Marítimo y Banco de Datos Oceanográficos durante el periodo de mayo'83 a mayo'91. España: MOPT, 1991. 9788460603665

FISHER, Nicholas I. Statistical analysis of circular data. 1993. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.

GARCÍA VALENCIA, Carolina y SIERRA CORREA, Paula C. Un golfo en el Caribe Colombiano. En: Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Santa Marta, Colombia.: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12, 2007. p. 13-21.

GERRITSEN, Herman, De VRIES, Hans y PHILIPPART, Marc. The Dutch Continental Shelf Model, in Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models. En: Coastal Estuarine Studies. 1995,

GORDON, ARNOLD L. . Circulation of the Caribbean Sea. En: Journal Geophysical Research. Diciembre 15, 1967, Vol. 72, No. 24 p. 6207-6223,

HASSELMANN, Klaus y HASSELMANN, Sussane. A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity-wave spectrum. En: Hamburger Geophysikalische Einzelschriften. 1981, Vol. (8): 52. Serie A. p. 122-128,

. A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity-wave spectrum. En: Hamburger Geophysikalische Einzelschriften. 1981, Vol. (8): 52. Serie A. p. 122-128,

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Pronóstico de pleamares y bajamares. 2004.

KJERVE, Björn. Tides of the Caribbean Sea. En: Journal of Geophysical Research. 1981, Vol. 86 p. 42423-44247,

LARGE, W.G., MCWILLIAMS, J.C. y DONEY, S.C. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a vertical K-profile boundary layer parameterization. En: Reviews of Geophysical. 1994, p. 363–403,

LEENDERTSE, Jan J. Ph. D. tesis: Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation. RM-5294-RR. . Santa Monica. California. USA.: Rand Corporation 1967. 293 p.

LEENDERTSE, Jan J. y GRITTON, Eugene C. . Reporte técnico de Computation Procedures: A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas. Tech. Rep. R-708-NYC. En: New York. New York. USA.: Rand Corporation., 1971. Vol. 2, p. 226-293.

LEENDERTSE, Jan J., ALEXANDER, Richard C. y LIU, Shao-Kung. . Reporte técnico: A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. . Santa Monica. California. USA.: Rand Corporation, 1973. Vol. I-IV, 136 p.

LERMA, Alexander Nicolae, THOMAS, Yves François y POSADA POSADA, Blanca Oliva. Atlas Climatológico del mar caribe Colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2012. p. 132. 978-958-8448-47-3

LONIN, Sergei y ESCOBAR, Carlos A. Aspectos sobre modelación numérica de la evolución morfológica en el mar Caribe. En: Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Red Iberoamericana en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Geológicos en el Litoral, 2009. p. 189-203.

LONIN, Sergei, LONINA, Irina S. y TUCHKOVENKO, Yuri S. Utilización del Modelo NedWAM para el Cálculo y Pronostico del Oleaje en el mar Caribe. En: Boletín Científico CIOH 17. 1996, p. 37-46,

MESA GARCIA, Julio Cesar. Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe colombiano Julio César Mesa García, I.C. Medellín Colombia, 2009, 114 p. (Tesis de maestría para optar al grado de magister en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

MESA, Oscar, POVEDA, Germán y VÉLEZ, Jaime I. Balances hidrológicos y atlas digital de antioquia. Medellín, Colombia: Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 2001. Vol. 2, 154 p.

Molinari, R.L., ATWOOD, D.K. y Duckett, C. Surface Currents in the Caribbean Sea as Deduced from Satellite Tracked Drifting Buoys. En: Proceedings of the Thirty-Second Annual Gulf and Caribbean Fisheries Institute. p. 106-113,

MONTOYA RAMIREZ, Rubén D. y OSORIO ARIAS, Andrés F. Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. En: Avances en recursos hidráulicos número 15. 15 de Mayo de 2007, p. 47-74, ISSN 0121 5701

POSADA JARAMILLO, Federico, ESCOBAR PINEDA, Heber A. y ESCOBAR SIERRA, Carlos A. Influencia del swell generado en el océano Atlántico en el oleaje incidente en la costa caribe colombiana. En: Libro de resúmenes del XIV seminario nacional de ciencia y tecnología del mar. 2010, p.194,

POSADA JARAMILLO, Federico y ESCOBAR SIERRA, Carlos A. VARIABILIDAD DE OLEAJES Y MAREAS EN EL LITORAL CARIBE COLOMBIANO. En: XX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA – BARRANQUILLA, COLOMBIA, 8 AL 10 DE AGOSTO DE 2012. 2012, ISBN 978-958-741-254-3

RESTREPO, Juan D. y LOPEZ, Sergio A. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America

En: Journal of South American Earth Sciences. 2008, Vol. 25 p. 1-21,

RESTREPO L., Juan Camilo, OTERO D., Luis y LÓPEZ I., Sergio A. CLIMA DE OLEAJE EN EL PACÍFICO SUR DE COLOMBIA, DELTA DEL RÍO MIRA: COMPARACIONES

ESTADÍSTICAS Y APLICACIÓN A PROCESOS COSTEROS. En: Revista Acad. Colomb. Cienc. 2009, Vol 33(128) p. 357-375, ISSN 0370-3908.

RICHARDSON, P.L. Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. En: Deep sea Research II. 2005, p. 35, DOI:10.1016/j.dsr2.2004.11.001

RÓLDAN, Paola Andrea. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá, Trabajo de grado. Medellín, Colombia: Facultad de minas, Universidad nacional, 2008. 109 p.

RUIZ SARRAZOLA, DAVID A., Metodología para simular la dinámica marina en el mar Caribe usando DELFT3D, Tesis de Maestría. Medellín, Colombia. Universidad EAFIT, 2015. 93 P.

SLUTZ, R.J., Lubker, S.J., Hiscox, J.D., Woodruff, S.D., Jenne, R.L. y Joseph, D.H. Comprehensive Ocean-Atmosphere Data. Boulder, Colorado: 1985.

SOUSA, M. C. DIAS, J. M. . Hydrodynamic Model Calibration for a Mesotidal Lagoon: the Case of Ria de Aveiro (Portugal). En: Journal of Coastal Research, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium). 2007, p. 1075-1080, ISSN 0749.0208

TEJADA VÉLEZ, Carlos Enrique DESARROLLO DE UN MODULO INFORMÁTICO PARA EL MANEJO DE DATOS DE OLEAJE VISUAL PARA LAS AGUAS JURISDICCIONALES COLOMBIANAS. En: Boletín Científico CCCP. 2003, No.9 p. 88-98,

TOLMAN, Hendrik L. The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. En: Technical Report 892, Faculty of Civil engineering, Delft University of Technology. 1989, 72 p.,

----- User Manual and system documentation of WAVEWATCHIII. Version 2.22. . En: Tech. Note 222, NOAA/NWS/NCEP/OMB. 2002a, p. 133,

----- Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. En: Technical Note 213 NOAA / NWS /NCEP / OMB 2002b, p. 233,

----- Validation of WAVEWATCHIII Version 1.15 for global domain. En: Nota técnica 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB. 2002c,

UCAR/NCAR/CISL/DSS > Data Support Section, Scientific Computing Division, National Center for Atmospheric Research, University Corporation for Atmospheric Research Monthly Discharge Data for World Rivers (except former Soviet Union) En: World Wide Web. 2002,

VAN RIJN, L.C. Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas. Holanda: Aquapublications, 2007.

VAN RIJN, L.C. WALSTRAA, D.J.R. GRASMEIJERB, B. SUTHERLANDC, J. PAND, S., SIERRAE, J.P. . The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the

time scale of storms and seasons using process-based Profile models. En: Coastal Engineering. 2003, Vol. 47 p. 295-327, ISSN 0378-3839

WALSTRA, D.J.R., VAN RIJN, L.C., BOERS, M y ROELVINK, D. Offshore sand pits: verification and application of hydrodynamic and morphodynamic models. En Proceso. En: 5th International Conference on Coastal Sediments. Vol 3 p. 14,

WANG, CHUNZAI. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. En: Climate Dynamics. 2007, Vol. 1 p. 411-422, DOI 10.1007/s00382-007-0243-z

WL|DELFT HYDRAULICS. Delft3D- Wave. Simulation of short waves with SWAN. User manual version 3.14. . Delft, Holanda: Deltares, 2009. 184 p.

------. Delft3D-Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual version 3.14. . Delft, Holanda: Deltares, octubre 2007.

WOODRUFF, S.D., SLUTZ, R. J., JENNE, R. L. y STEURER, P.M. . A comprehensive ocean-atmosphere data set En: Bulletin of the American Meteorological Society. 1987, Vol. 68 p. 1239-1260,

Wust, G. Stratification and circulation in the Atillean-Caribbean Basins. 1964. Palisades, New Yor, USA.: Columbia University Press, 1964. 201 p.